

# 산지 지형에서의 오염물질 확산에 관한 가시화 연구

길태호\* · 이정목† · 이상준††

## Visualization of Pollutant Dispersion over Hilly Terrain

Tae-Ho Kil, Choung Mook Lee, Sang-Joon Lee

### Abstract

The wind flow and pollutant dispersion over a two-dimensional sinusoidal hilly obstacle with slope (the ratio of height to half width) of 0.7 have been investigated experimentally and numerically. Flow over a single sinusoidal hill model was visualized in a subsonic wind tunnel. The mean velocity profiles, turbulence statistics, and pollutant concentration distribution were measured at the Reynolds number based on the obstacle height ( $H=40\text{mm}$ ) of  $2.6 \times 10^4$ . Experimental results for flow over a flat ground were agreed with the theoretical and numerical results. When a pollutant source is located behind the hilly terrain, the pollutant dispersion appeared even in the upstream region due to recirculation flow.

**Key Words :** Pollutant dispersion (오염물질 확산), Hilly terrain (산지지형), Numerical simulation (수치해석), Flow visualization (유동 가시화)

### 1. 서론

최근 폭발적인 인구의 증가, 산업의 발달 등으로 인하여 환경 오염문제가 사회적으로 주목 받기 시작하고 대기 중 오염물질의 확산 문제는 시급한 연구 과제로 부상하게 되었다. 특히 공장 지대에서 배출되는 공해물질이나 자동차에서 배출되는 배기 가스들은 공중 보전에 유해한 영향을 미칠 뿐 아니라 가시도를 감소시킨다. 또한, 이러한 오염물질이 대기 유동에 의하여 넓게 확산될 때는 주변지역의 생태계를 파괴시키는 심각한 환경문제로 발전할 수도 있다. 따라서 복잡한 지형(산간지형, 건축물 밀집지형, 엄밀한 의미에서는 오염원 높이를 초과하는 지형이 오염원의 전후방에 있을 때를 복잡지형이라고 칭함)을 지나는 대기 유동의 분석은 이러한 오염물질의 확산현상의 예측에

기초자료를 제공하고 건축물이나 주거단지 등의 위치 선정, 그 외 여러 관련 분야에 중요한 정보로 이용될 수 있다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

산지지형을 지나는 대기 경계층 유동에 관한 실험적 연구를 위하여 본 연구에서 사용되어진 풍동은 측정부 단면 (test section)이  $0.6\text{m} \times 0.72\text{m}$  (높이 x 폭)이고 길이가  $6.0\text{m}$  인 POSTECH 아음속 풍동을 사용하였다.

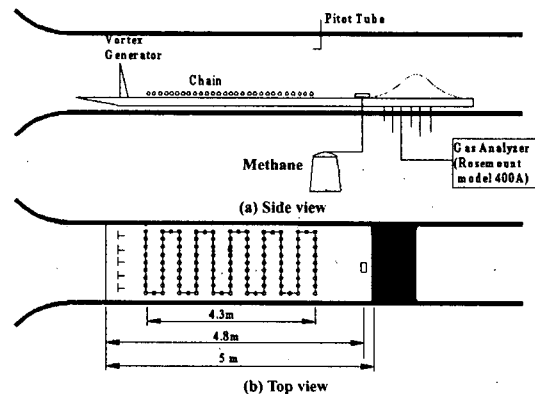


Fig. 1 Wind tunnel set-up for simulating the atmospheric boundary layer

† 포항공과대학교 기계공학과 교수

E-mail : cmlee@postech.ac.kr

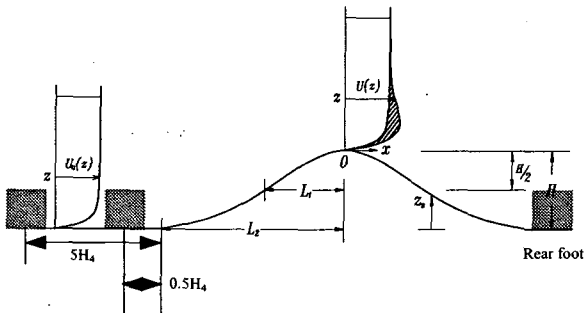
†† 포항공과대학교 기계공학과 교수

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

\* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

풍동 형상은 위의 Fig.1과 같으며 대기경계층을 모사 생성시키기 위하여 삼각형의 스파이어와 체인을 사용하였으며 체인의 간격은 30cm이었다.

시험부 실험에 사용된 2 차원 언덕모형은 강화 섬유 플라스틱 (FRP, fiber reinforced plastic)으로 제작되었으며 형상은 대칭형상인 사인 sine 함수 형태의 모델 (sinusoidal shape model)을 채택하였다. 모델 형상과 수학적 표현은 아래의 Fig. 2 에 나타내었다. 언덕의 형태를 나타내는 기하학적 변수로는 언덕의 높이  $H$  와 언덕 상반부의 높이가  $H/2$  인 지점에서의 언덕의 반폭이  $L_1$  이며, 언덕의 기울기는  $s = H/(2L_1)$  으로 정의하였다.



Hill Elevation 
$$y = \frac{H}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi x}{L_2} \right)$$

Fig. 2 Description of hill model tested

Fig.2에서 산지 전후에 표시한 사각형은 오염원의 위치를 나타내며 결과 그림 Fig.7,10,11에서 각각의 오염원의 위치를 x 좌표의 원점으로 조정하였다.



Fig. 3 Photograph of concentration measurement set-up

또, 오염원 노즐출구의 높이는 풍동의 바닥면과 일치하게 고정시켰다. 풍동에서 대기유동장의 속도측정은 피토관 (pitot-tube)를 이용하여 이루어졌고 난류강도는 열선유속계 (hot-wire)를 이용하여 측정하였다. 산지의 표기법은 SmHm 으로 나타내었는데 m 은 산의 기울기를 나타내며 n 은 산지의 높이를 나타낸다. 예를 들어 S4H4 에서 S4 는 산지의 기울기가 0.4 임을 나타내며, H4 는 산지의 높이가 4cm 임을 나타낸다.

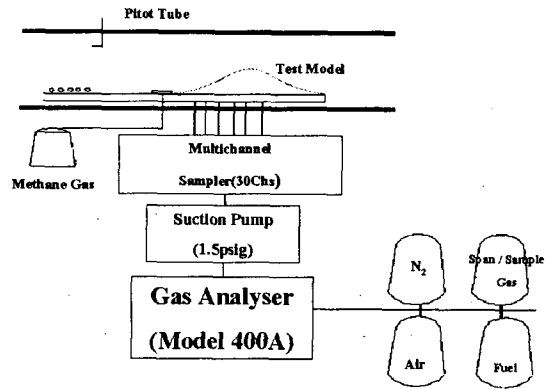


Fig. 4 Schematic diagram of the concentration measurement set-up

오염물질의 농도 측정에는 Rosemount사의 모델 400A 탄화수소 분석기를 이용하였는데 이 장비는 분석을 원하는 탄화수소 가스의 이온화 정도를 연속적으로 측정해서 농도를 구하는 원리를 이용하고 있다. 또한, 산지 여러 지점의 농도분포를 동시에 측정하기 위해서 다지점 측정계 (multi-sampler)를 제작하였으며 측정장비의 전체적인 형태를 Fig.4에 나타내었다.

산지주변 대기유동을 가시화하기 위해서 smoke-wire 방법을 이용하였다.

### 3. 수치적 해석

유동해석을 위해 사용되어진 산지 외형은 아래의 수식으로 표현되며 수치계산의 입력 조건으로 사용되었다.

$$h(x) = \frac{H}{2} \left\{ 1 + \cos \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{|x|}{L_1} \right) \right\} \quad \text{for } |x| \leq L_2$$

$$h(x) = 0.0 \quad \text{for } |x| \geq L_2$$

본 연구에서 수치해석을 위하여 사용한 계산영역을 Fig.5에 나타내었으며 입구 조건인 원방 상류면에서는 평판 대기경계층에서의 풍동 실험의

측정결과를 사용하였으며 하단 경계조건은 지면에서의 점착조건 (no-slip condition), 상단 경계에는 수직방향의 속도벡터 구배가 영이라는 조건 (zero-gradient boundary condition)을 적용하였다. 출구 조건 (exit boundary condition)으로는 수평 방향의 속도구배는 0이라는 조건 (out-flow boundary condition)을 추가하였다. standard  $\kappa-\epsilon$  난류모델에서 *udf* (user defined function)을 이용하여  $\kappa$ 와  $\epsilon$ 의 각각에 대해서 경계조건을 입력하였으며 입력 속도 profile도 *udf*를 이용해서 추가하였다.

계산격자는 경계면 일치 좌표계 (body fitted coordinated system)이며 Fluent 상용 code를 이용하여 Eulerian 방법으로 산지 지표에서 오염물의 확산농도를 계산하였다. 사용된 격자의 형태는 Fig.6에 나타낸 바와 같다.

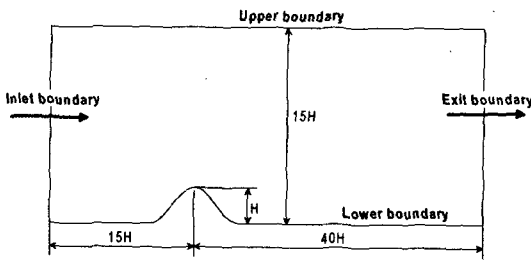


Fig. 5 Schematics of the calculation domain

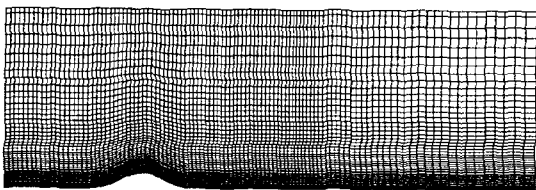


Fig. 6 Computational grid system

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 평지에서의 농도 특성

평지에서의 농도특성 변화는 실험 결과의 정확성을 이론값과 쉽게 비교할 수 있어 농도 실험의 정확성 검증 차원에서 자주 활용되어 진다. Fig.7은 실험치와 계산치, 이론치 결과들을 비교하여 나타낸 것이다. 수치해석 결과는 2차원 오염원에 대한 수치계산 결과를 Eulerian 확산 모델에 기초하여 교정한 3차원 오염원에 대한 결과이다. 계산치와 이론치의 차이는 오염원으로 부터의 거리가 멀어질수록 작아지며 전반적으로 세가지 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig.7에서  $x$ 좌표의 원점은 오염원 발생 지점을 나타내며, 산지 주변에서 오염 확산을 나타내는 결과에서도 원점은 오염원이 있는 위치를 나타낸다.

##### 4.2 단독 2 차원 언덕

아래의 Fig.8은 smoke-wire방법에 의한 산지 주변의 유동을 가시화한 결과이다. 이 그림으로부터 대기 경계층이 매우 강한 난류특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

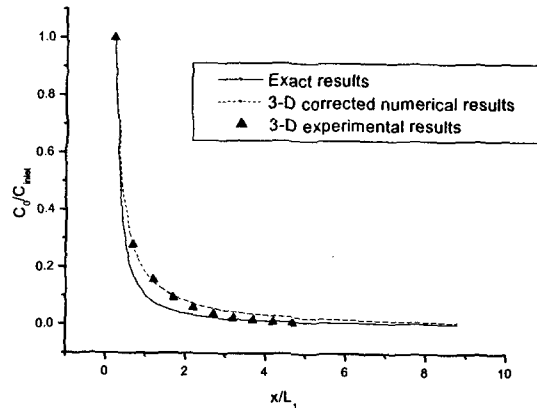


Fig. 7 Comparison of theory, numerical and experimental results



Fig. 8 Visualization of flow over S7H7 single hill

아래의 Fig.9는 수치해석 결과로 S7H7산지 주변의 유동을 수치적으로 가시화한 것인데, 산지 후방에서 유동박리가 발생하여 재순환 영역 (recirculation zone)이 형성되고 있음을 보여 준다.

Fig.10은 위의 그림 Fig.9와 같은 유동장 하에서 수치해석과 실험으로 구한 산지 주변의 오염물 확산 거동 결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 오염물이 산지의 전방에서 발생할 때에는 발생지점을 조금 지나서는 오염물의 영향이 크기 않으며 산지 후방에서는 확산농도가 거의 0에 가까운 것을 알 수 있다.

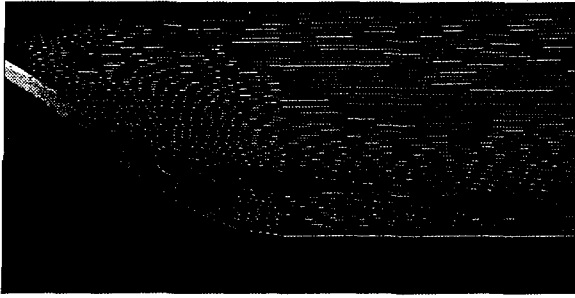


Fig. 9 Streamline distribution behind S7H7 hill

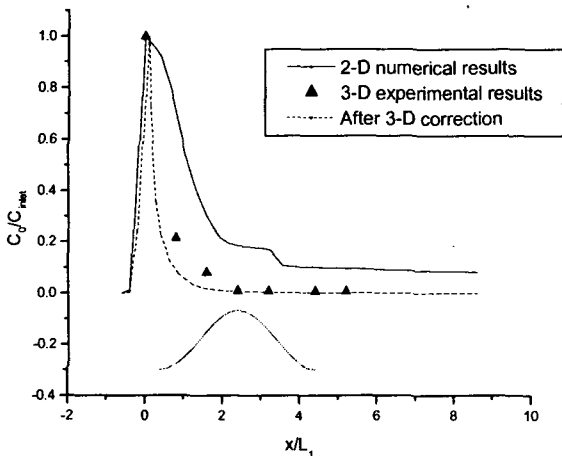


Fig.10 Concentration distribution over the hill S7H7 that source is at  $0.5H_4$  ahead of the front foot of the hill

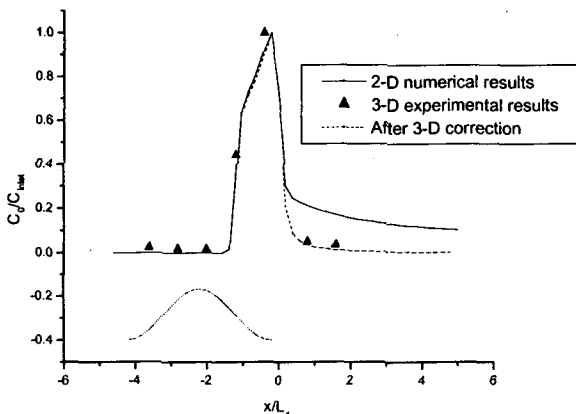


Fig.11 Concentration distribution over the hill S7H7 that source is located at hill rear foot

이것을 산지 후방에서 발생한 오염물질의 확산 분포 결과를 나타낸 Fig.11과 비교하면 오염원이 전방에 위치할 때가 훨씬 산지 주변의 오염물 확산에 긍정적인 영향을 미침을 알 수 있다.

위의 그림 Fig.11에서는 산지 후방에서 발생한 재순환 (recirculation)에 의해서 오염물질의 확산이 오염원 전방영역에서도 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이것으로부터 유동의 방향이 오염물 확산에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 대기 경계층 속에 놓여 있는 2차원 산지 (S7H7)에 대한 농도확산 문제를 실험 및 수치적 방법으로 해석하였다. 실험시 Reynolds 수는 S4H4 산지의 높이 ( $H_4$ )에 기준하여  $2.0 \times 10^4$  이었다.

평지에 대해 측정된 평균농도 분포 결과는 이론값 및 수치해석 결과와 잘 일치하여 실험결과와 사용한 측정 기법의 정확성을 검증하였다.

기울기가 0.7 인 산지의 경우 산지 후방 (hill back)의 재순환 유동에 의해서 오염원의 정체가 심하며 특히 오염원이 산지 후방에 위치하는 경우 산지의 전방 영역까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

## 후기

본 연구는 국가지정연구실 (NRL) 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 1) Bowen, A.J., "The Prediction of Mean Wind Speed Above Simple 2D Hill Shapes," J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn., Vol. 15, pp. 259-270, 1983.
- 2) B. R. White, "Wind-Tunnel Study of Atmospheric Dispersion of Near-Field Exhaust from a Stack," Mech., Aero. & Materials Eng. Dept., Univ. of California at Davis, 1991.
- 3) J. E. Cermak, "Physical Modeling of Flow and Dispersion over Complex Terrain," Boundary-layer Meteorology, Vol. 30, pp. 261-292.
- 4) Kim, Hyun Goo(1997), "Numerical Investigation of the Pollutant Dispersion over Complex Terrain," Ph.D. Dissertation, Dept. of Mech. Eng., Pohang Univ. of Sci. & Tech., 184 pp.