



논문

건물 집합 지역에서 대기안정도 변화에 따른 악취 확산에 대한 전산유체역학 연구

A CFD Study on Odor Dispersion around Building Array under Different Atmospheric Stability Conditions

정상진*

경기대학교 환경에너지공학과

Sang Jin Jeong*

Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University,
Suwon, Republic of Korea

접수일 2020년 10월 14일
수정일 2020년 11월 16일
채택일 2020년 11월 16일

Received 14 October 2020
Revised 16 November 2020
Accepted 16 November 2020

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-249-9734
E-mail : sjjung@kyonggi.ac.kr

Abstract Odor dispersion from the ground level emission in the idealized building block array was investigated using Computational Fluid Dynamics (CFD). The SST $k-\omega$ turbulence closure model was used to evaluate the flow and odor dispersion in the idealized building block array. The numerical results of the flow and odor dispersion were compared with the experimental data from the wind tunnel and water tank. Three validation metrics (the fractional bias (FB), the normalized mean square error (NMSE), and the fraction of predictions within a factor of two of observations (FAC2)) were used to obtain the optimal turbulent Schmidt number. The result showed the optimal turbulent Schmidt number, resulting in 0.7. Six atmospheric stability conditions, namely A, B, C, D, E, F, were used to evaluate the stability effect of odor emission dispersion. The impact distance of odor plume were larger under neutral conditions (D) than under unstable (A, B, C) and stable (E, F) conditions.

Key words: CFD model, Odor dispersion, Building array, Atmospheric stability

1. 서론

도시의 인구 집중과 도시 구조물의 확충에 따른 유동장 변화 때문에 도시 대기질이 악화되었다. 이에 따라, 최근 20년 동안 도시지역에서 대기 오염물의 확산은 많은 연구자들의 관심 대상이 되었다. 도시에서 배출된 대기 오염물이 확산되어 주변 지역에 영향을 주는 과정에 대한 정확한 이해는 환경 오염에 의한 위해도 평가와 환경 보호 측면에서 필수적인 사항이다. 도시지역에서는 대기 유동과 도시 건축물들의 상호작용으로 복잡한 유동장과 난류 유동이 형성되고 그 결과 도시 대기 오염물의 확산 과정이 복잡하게 된다.

또한 대기안정도와 같은 기상조건도 대기 오염물의 확산에 영향을 미치게 된다(Guo *et al.*, 2020).

도시 내 건물이나 건물 주변에서 배출되는 대기 오염물이 주변 지역 거주자에게 미치는 영향을 평가하기 위하여 이들 배출원에서 배출되는 대기 오염물의 건물 주변과 인접 지역에서 확산을 정확히 평가할 필요가 있다. 도시지역에서 대기에 배출되는 오염물은 자동차 배출 가스, 먼지, 꽃가루, 바이러스, 독성 가스 그리고 악취 등이 있다(Dai *et al.*, 2018). 이들 오염물 중 악취는 특히 악취 배출원 주변 지역에 많은 민원을 야기하는 대표적인 대기 오염물이다.

도시지역에서 건물 주변 유동장과 농도장을 예측하

기 위한 연구로는 현장관측, 축소모형 실험(예, 풍동 실험, 수조실험), 가우시안 모델을 사용한 반경험식을 이용한 연구 그리고 전산유체역학을 이용한 수치해석적 연구가 있다. 일반적으로 현장관측 연구는 시간과 비용이 많이 드는 연구로 특정 건물 조건이나 기상 조건에 대한 연구 결과만 얻을 수 있는 단점이 있다. 많은 연구자들이 건물 주변에서 대기 오염물의 확산과 이동을 평가하기 위하여 축소모형 실험 연구를 하였다. 그러나 대기경계층 내에 설치된 건물 주변 유동의 복잡성 때문에 축소모형을 이용한 연구는 건물 주변 농도 예측에 어려움이 많았다(Tominaga and Stathopoulos, 2018).

악취물질의 대기 중 이동을 평가하기 위해 사용되는 확산 모델은 대부분 가우시안 모델이다. 가우시안 확산 모델(예, AERMOD (Brancher *et al.*, 2019), GRAL (Oetl *et al.*, 2018), OdiGauss (Danuso *et al.*, 2015), CALPUFF (de Melo *et al.*, 2012))을 이용하는 반경험적인 방법은 상대적으로 간단한 방법이지만, 결과에 불확실성이 많고 불규칙한 지형에서 적용하는 데는 한계가 있다. 따라서 반경험적인 가우시안 확산 모델은 상대적으로 단순 지형에서 악취로 인한 악취 배출원과 수용체 사이 이격거리 평가를 위하여 주로 많이 사용되어 왔다(Conti *et al.*, 2020).

전산유체역학을 이용한 악취물질의 확산 예측은 복잡지형이 확산 과정에 미치는 영향을 평가할 수 있기 때문에 복잡지형에서 악취 확산 연구에 많이 사용되어 왔다. 악취물질의 확산 평가를 위하여 전산유체역학을 이용한 최근의 연구에는 Lin *et al.* (2009), Małzi *et al.* (2010), Hong *et al.* (2011a, b), Jeong (2017) 등의 연구가 있다. Lin *et al.* (2009)은 FLUENT SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ 모델을 사용하여 다양한 대기안정도 조건하에서 점 배출원에서 배출되는 악취물질의 유공 방풍벽 주변에서 이동을 연구하였다. 이들은 연구 결과 방풍벽 주변 악취 플룸(odor plume)의 이동 길이는 중립 대기에서 강한 대류 효과 때문에 불안정 및 안정 대기에서 보다 짧게 나온다고 하였다. Małzi *et al.* (2010)은 폐수처리장 주변 건물 지역의 악

취 확산 평가를 위하여 FLUENT CFD $k-\epsilon$ turbulence model을 사용하였다. 연구 결과 풍속이 낮은 경우 배출원 근처 농도가 상승하고, 인접 지역 건물로 인하여 건물 주변에서 유동 정체가 발생하여 건물 주변 악취 농도를 증가시킨다고 하였다. Hong *et al.* (2011a, b)은 다양한 기상조건과 복잡지형에서 축산농가 악취의 이동을 평가하기 위하여 전산유체역학 모델을 사용하였다. 그들은 전산유체역학을 이용한 연구 결과가 현장관측자료를 잘 모의할 수 있다고 하였다. Jeong (2017)은 전산유체역학 모델을 사용하여 중립대기에서 건물 옥상에서 배출되는 악취물질의 흐름방향(streamwise direction) 하류에 있는 건물에 미치는 영향을 연구하였다. 이상의 연구들에서 다양한 지형 조건에서 악취물질의 이동 평가를 위하여 수행하였으나 건물 집합(building array) 지역에서 악취물질의 이동에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 상용 모델인 ANSYS Fluent 14.5 모델을 사용하여 건물 집합 지역에서 악취물질의 대기 안정도 변화에 따른 이동과 확산 변화를 평가하였다. 악취물질로는 도심 하수도 등에서 배출 가능한 황화수소를 선택하고 배출원 위치는 지표 부근으로 하였다. 배출원에서 악취물질의 농도는 한국의 악취방지법에서 규정한 공업지역에서 배출허용기준인 1000 OU 농도로 가정하였다(Jeong, 2017). 대기안정도 조건은 안정, 중립, 불안정 조건을 사용하였다. 건물 집합 지역에서 악취물질의 이동을 잘 모의할 수 있는 적정 난류 스미드 수(Turbulent Schmidt number)를 구하기 위하여, 중립 대기 조건일 때 수조실험에서 구한 농도장 자료와 본 연구에서 구한 자료의 비교 평가를 실시하였다. 비교에서 구해진 결과를 적용하여 다양한 안정도에 대한 연구를 수행하고 결과를 제시하였다.

2. 연구 방법

2.1 기본 방정식

본 연구에서는 건물 집합 지역 주변 유동과 농도 장

을 평가하기 위하여 상용 모델인 ANSYS Fluent 14.5 를 사용하였다. FLUENT 모델에서 유동장 평가를 위한 기본 방정식으로 질량 및 운동량 방정식 그리고 에너지방정식은 다음과 같다(Tan *et al.*, 2018).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho c_v T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} c_p T) = \nabla \cdot (k_T \nabla T) \quad (3)$$

여기에서 t 는 시간, v 는 유속, p 는 압력, τ 는 전단응력 g 는 중력가속도를 나타낸다. ρ 는 공기의 밀도를 나타 내고, T 는 온도를 나타낸다. c_p, c_v 는 비열, k_T 는 열전 도도 (the thermal conductivity)이다. 본 연구에서 난 류모델은 SST $k-\omega$ 모델을 사용하였다.

2.2 악취농도의 계산

화학종 수송을 계산하기 위하여 이류-확산 모듈(the advection-diffusion module)을 사용하였다. FLUENT 모델에서 질량 확산 과정은 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho u Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \quad (4)$$

여기에서 R_i 는 화학반응에 의한 화학종 i 의 생성율 (the net rate of production of species), S_i 는 사용자 지정 소스와 확산 과정에서 생성율 (the rate of creation by addition from the dispersed plus any user-defined sources), J_i 는 화학종 i 인 혼합물의 확산 플럭스 (diffusion flux of the mixture), Y_i 는 화학종 i 의 질량 분율을 나타낸다.

본 연구에서는 악취가스로 황화수소(H_2S)를 사용 하였다. Lin *et al.* (2007, 2009)에 따르면 모형에서 유 체를 청정공기와 황화수소로 모형화하고 배출원에서 질량 분율을 다음 식으로 정의한다.

$$Y_s = \frac{O_{cg} \times m_{H_2S}}{(P_a M / RT) + O_{cg} \times m_{H_2S}} \quad (5)$$

이 식의 Y_s (kg/kg)는 유입구에서 질량 분율로 전체 공 기질량에 대한 악취가스의 질량 비이다. T (K)는 온도 이고, P_a (101,325 Pa)는 해면에서 대기압이다. M (0.028966 kg/mol)은 건조공기의 분자량이고 R (8.31432 J/(mol·K))은 보편기체상수 (the universal gas constant) 를 나타낸다. O_{cg} 는 배출원의 악취농도 (OU/m³)이고 m_{H_2S} (7.0×10^{-9} kg/OU)는 1 악취단위 (OU, Odor Unit) 를 생성하는 데 요구되는 황화수소의 질량이다. 악취 단위는 악취가스를 청정공기로 희석하였을 때 더 이 상 악취가 나게 되지 않는 청정공기의 희석배수를 나 타낸다. 악취단위는 악취 검지한계 농도로 사용될 수 있다 (Lin *et al.*, 2007). 본 연구에서 악취물질의 질량 분율과 악취농도는 식 (5)를 이용하여 계산하였다.

2.3 계산영역 및 경계조건

본 연구에서 계산 영역의 크기와 경계조건은 COST-Action 732 가이드라인 (Franke *et al.*, 2007)에 따라 결 정하였다. 그림 1에서는 계산 영역과 경계조건에 대 한 모식도를 나타내었다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 계산 영역은 $45H \times 6H \times 40H$ (여기에서 H (= 10 m) 는 건물 높이)로 하였다. 좌표계는 흐름방향(X), 높이 방향(Y), 횡방향(Z)을 사용하였다. 유입구와 첫 번째 건물 사이의 거리는 가이드라인에 따라 5H 간격으로 하고 유출구와 마지막 건물 사이의 간격은 27H로 하

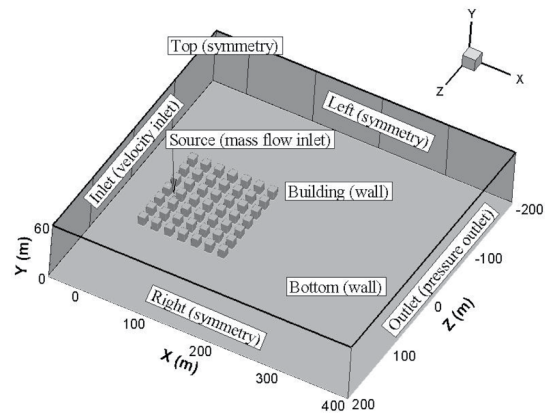


Fig. 1. Computational domain with building array and boundary conditions.

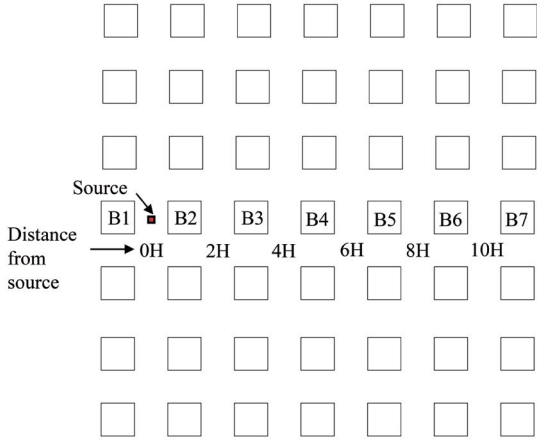


Fig. 2. Schematic illustration of building arrangements and source position. H is building height.

였다. 중립 대기조건에서 본 연구 유동장 결과와 Brown *et al.* (2001)의 풍동실험 결과 자료를 비교하기 위하여 흐름방향에 따라 7×7개의 건물을 설치하여 전체 건물의 개수를 49개로 하였다. 약취 배출원은 중심선을 따라 첫 번째와 두 번째 건물 사이의 가운데 바닥에 두었다.

계산영역의 격자(mesh)는 건물과 바닥 부근에서는 동일 크기로 하였다. 나머지 격자는 확장 계수가 1.2로 변화되는 격자 크기를 사용하였다. 그림 2에서는 약취 배출원과 건물의 배치에 대한 모식도를 나타내었다.

유입구에서 안정도 변화에 따른 유속은 Pieterse and Harms (2013)에 따르면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0}, \quad L_{MO} = \infty \text{ neutral} \\
 u &= \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \frac{y}{y_0} + \frac{5y}{L_{MO}} \right), \quad L_{MO} > 0 \text{ stable} \\
 u &= \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \frac{y}{y_0} - \ln \left\{ \left(\frac{1+x^2}{2} \right) \cdot \left(\frac{1+x}{2} \right)^2 \right\} \right. \\
 &\quad \left. + 2 \tan^{-1}(x) - \frac{\pi}{2} \right), \quad L_{MO} < 0 \text{ unstable} \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기에서 $x = \left(1 - \frac{16y}{L_{MO}} \right)^{1/4}$, $y(m)$ 는 지면에서 높이, L_{MO} 는 Monin-Obukhov 길이이다. 이들 식에서 u_* 는 마찰속도, κ 는 칼만 상수이다. 본 연구에서는 마찰속도 $u_* = 0.23 \text{ m/s}$ 그리고 조도계수 $y_0 = 0.15 \text{ m}$ 를 사용하였다. 온도 프로파일은 Lin *et al.* (2007)이 제시한 다음 식을 사용하였다.

$$T(y) = -\gamma_d(y - y_s) + T_s, \quad L_{MO} = \infty \text{ neutral}$$

$$\begin{aligned}
 T(y) &= -\gamma_d(y - y_s) + T_s \left(1 + \frac{u_*^2}{\kappa^2 g L_{MO}} \right. \\
 &\quad \left. \times \left\{ \ln \frac{y}{y_s} + \frac{5(y - y_s)}{L_{MO}} \right\} \right), \quad L_{MO} > 0 \text{ stable}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T(y) &= -\gamma_d(y - y_s) + T_s \left(1 + \frac{u_*^2}{\kappa^2 g L_{MO}} \right. \\
 &\quad \left. \times \left\{ \ln \frac{y}{y_s} - 2 \ln \frac{1+x_0}{1+x_s} \right\} \right), \\
 L_{MO} &< 0 \text{ unstable} \quad (7)
 \end{aligned}$$

이들 식에서, $T(y)$ 는 높이 y 에서 대기의 온도(K), $x_0 = \left(1 - \frac{16y}{L_{MO}} \right)^{1/2}$, $x_s = \left(1 - \frac{16y_s}{L_{MO}} \right)^{1/2}$, $y_s (1.35 \text{ m})$ 는 지면에서 높이, $\gamma_d (0.01 \text{ K/m})$ 는 건조단열감율, $T_s(\text{K})$ 는 y_s 높이에서 온도 그리고 $g (9.8 \text{ m/s}^2)$ 는 중력 가속도이다.

난류에너지 k 의 수직방향 프로파일에 대하여 Pieterse and Harms (2013)는 안정도에 따라 다음 식을 제시하였다.

$$\begin{aligned}
 k(y) &= 5.48u_*^2, \quad L_{MO} = \infty \text{ neutral} \\
 k(y) &= 5.48u_*^2 \left(\frac{1 + 4y/L_{MO}}{1 + 5y/L_{MO}} \right)^{1/2}, \\
 L_{MO} &> 0 \text{ stable} \\
 k(y) &= 5.48u_*^2 \left[\left(1 - \frac{y}{L_{MO}} \right) \left(1 - \frac{16y}{L_{MO}} \right)^{1/4} \right]^{1/2}, \\
 L_{MO} &< 0 \text{ unstable} \quad (8)
 \end{aligned}$$

대기안정도에 따른 난류 에너지소산의 수직방향 프로파일은 안정도에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon(y) &= \frac{u_*^3}{ky}, & L_{MO} &= \infty \text{ neutral} \\ \varepsilon(y) &= \frac{u_*^3}{ky} \left(1 + \frac{4y}{L_{MO}}\right), & L_{MO} &> 0 \text{ stable} \\ \varepsilon(y) &= \frac{u_*^3}{ky} \left(1 - \frac{y}{L_{MO}}\right), & L_{MO} &< 0 \text{ unstable} \end{aligned} \quad (9)$$

상용 FLUENT 모델을 사용하므로, Blocken *et al.* (2007)에 따라 벽면 경계조건을 다음과 같이 지정하였다.

$$k_s = \frac{9.793y_0}{C_s} \quad (10)$$

여기에서 k_s 조도높이(roughness height)와 C_s 조도상수(roughness constant)는 벽면 함수를 만족하기 위해 지정해야 하는 조건이다. 조도높이는 벽면 인접 격자의 중심까지 거리보다 작아야 한다. 만일 벽면 인접 셀의 크기가 0.5m인 경우에는 인접 셀의 중심까지 거리 0.25 m보다 작아야 하므로 0.24 m로 지정할 수 있다. 이 경우 조도상수 C_s 는 6.12가 된다.

본 연구에서 계산된 악취농도와 수소실험(Hilder-mann and Chong, 2007) 관측 농도와 비교하기 위하여 다음 식으로 표시되는 무차원 농도(K_{non})를 사용하였다.

$$K_{non} = \frac{CH^2U_H}{Q} \quad (11)$$

여기에서 U_H (m/s)는 건물 높이($H=10$ m)에서 풍속, C 는 계산된 악취물질의 농도이다. Q (OU/s)는 악취물질(황화수소)의 배출량으로 1000 OU/s를 사용하였다. 배출구의 크기는 가로×세로=1 m×1 m로 하고, 배출구 온도는 FLUENT 모델의 기본 옵션인 300 K를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 격자 민감도 평가

Tominaga *et al.* (2008)는 격자 해상도에 대한 검토 작업은 해상도를 증가하여도 결과치가 크게 변하지 않을 때까지 수행해야 한다고 하였다. Franke *et al.* (2004)는 건물 주변 유동장 모의를 위하여 각 건물 면에 최소 10개의 격자를 사용하여야 할 것을 추천하였다. 본 연구에서는 건물 면에 대하여 10개(격자 크기=1.0 m), 20개(격자 크기=0.5 m) 그리고 25개(격자 크기=0.4 m)인 3가지 격자를 사용하여 격자 민감도를 평가하였다.

그림 3에는 대기안정도가 중립일 때 수치해석 모델의 3가지 격자 크기 변화에 따른 결과 평가를 위하여 Brown *et al.* (2001)의 풍동실험과 본 연구 결과를 이용하여 배출원 위치에서 무차원 유속과 무차원 난류 운동에너지의 무차원 높이(Y/H)에 따른 변화를 나타

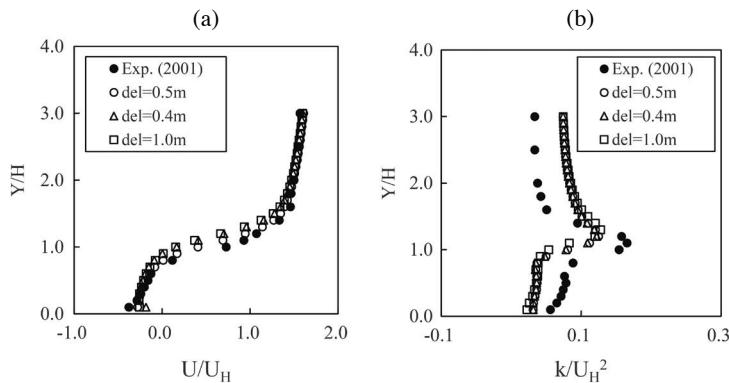


Fig. 3. Comparison of vertical distribution of (a) streamwise velocity and (b) turbulent kinetic energy at source position.

내었다. 무차원 유속 프로파일에서 3가지 결과 모두 전체적인 수직방향 프로파일의 크기와 경향을 잘 모의하였다. 무차원 난류에너지 프로파일은 수치해석 결과가 풍동실험의 전체적인 변화 경향은 잘 모의하였다. 그러나 난류운동에너지의 크기에 대해서는 수치해석 결과는 풍동실험 결과보다 지표부근에서 과소 평가되고 고공에서는 과대평가되었다. 이와 같은 결과는 SST $k-\omega$ 모델을 포함하는 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 모델들이 건물 주변의 평균 유동장만 계산하고 건물 주변에서 유동 특성인 천이적인 거동을 모의하지 못하는 한계성에 기인한 일반적인 경향(Du *et al.*, 2020)으로 판단된다. 그러나 3가지 격자 크기에 따른 수치해석 결과들 사이에는 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 본 연구는 건물 부근 격자 크기를 0.5m로 하여 이후 연구를 수행하였다.

3.2 난류 스미드 수 분석

난류 스미드 수(Turbulent Schmidt number)는 난류유동에서 운동량 확산과 질량 확산 비를 나타내는 변수이다. Gorié, *et al.* (2010)에 따르면 전산유체역학을 이용한 농도장 계산에서 난류 스미드 수는 중대한 변수이다. Gualtieri *et al.* (2017)은 대기 시스템에서 난류 스미드 수는 0.1~1.3 사이 값을 가지며 유동 환경에 따라 달라지는 변수라고 하였다. 따라서 대상 유동 환

경에서 농도장의 모의 중 적정 난류 스미드 수를 찾는 것은 모델의 적용성 평가를 위한 중요한 과정이다.

적정 난류 스미드 수를 찾기 위하여 수치해석 결과를 Hildermann and Chong (2007)의 수조실험 결과와 비교하였다. 정량적인 비교를 위하여 Chang and Hanna (2004)가 제시한 평가 방법을 사용하였다. 이들의 평가 방법에 따르면 수치 모델의 모의 능력은 Fractional bias (FB), The normalized mean square error (NMSE), The geometric mean bias (MG), The geometric variance (VG) 및 The fraction of predictions within a factor of two of observations (FAC2)를 사용하여 평가한다. Chang and Hanna (2004)에 따르면 ‘완전한 모델(Perfect model)’은 FB, NMSE=0 그리고 MG, VG, FAC2=1.0이 되어야 한다. 이들 파라미터 중 MG, VG는 계산 결과 농도가 차수 크기(odors of magnitude)로 변화할 때 평가에 적절한 변수이다. 본 연구의 결과 자료는 동일 차수에 들어가기 때문에 3가지 파라미터 FB, NMSE, FAC2를 이용하여 결과를 검토하였다.

그림 4에서는 실험 자료와 난류 스미드 수에 따른 결과를 비교하기 위한 자료로 배출원에서 $X=2H$ 및 $6H$ 떨어진 하류에서 무차원 농도의 수직방향 프로파일을 나타내었다. 농도 계산을 위해 사용된 난류 스미드 수는 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 등 5가지이다. 전체적으

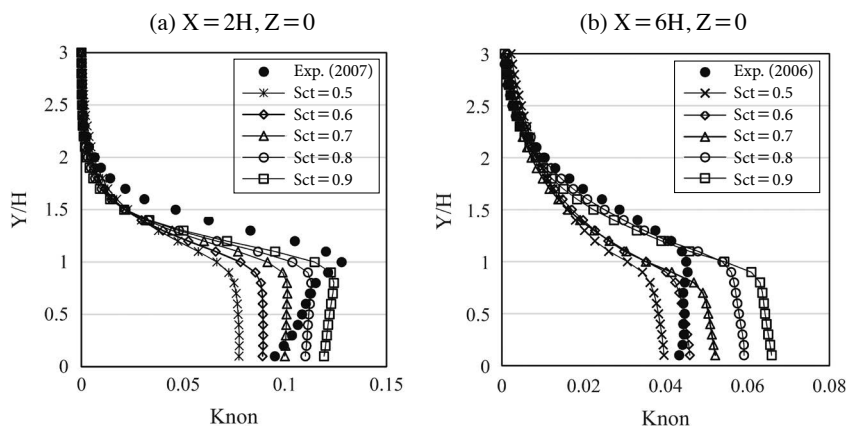


Fig. 4. Vertical profile of normalized concentration for various turbulent Schmidt numbers at (a) $X=2H$ and (b) $X=6H$ from source.

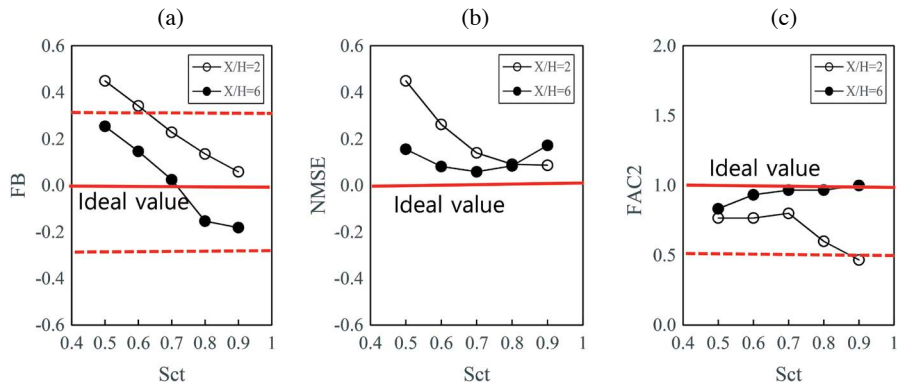


Fig. 5. Sensitivity of the turbulent Schmidt number (Sct) for the validation metrics: (a) FB, (b) NMSE, and (c) FAC2. Solid line is ideal value and dotted line is acceptable value.

로 무차원 농도는 난류 스미드 수의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 건물 사이 높이 ($Y/H < 1.0$)에서의 증가가 많았으며 건물 위 높이 ($Y/H > 1.5$)에서는 난류 스미드 수의 증가에 따른 변화가 적게 나타났다. 이와 같은 난류 스미드 수 증가에 따른 농도 증가 경향은 Longo *et al.* (2019)이 건물 주변에서 난류 스미드 수의 증가에 따라 무차원 농도 값이 증가한다고 제시한 경향과 유사한 결과이다.

그림 5에서는 그림 4에 나타난 무차원 농도 자료를 이용하여 5가지 난류 스미드 수에 대하여 평가한 통계 파라미터를 나타내었다. Chang and Hanna (2004)은 일반적으로 ‘적용가능 (acceptable) 모델 성능’이 되려면 $-0.3 < FB < 0.3$, $NMSE < 4.0$, $0.5 < FAC2 < 2.0$ 범위를 만족할 것을 추천하였다. 그림 5에서 나타난 바와 같이 $X/H = 2$ 에서 FB는 난류 스미드 수가 0.5, 0.6인 경우를 제외하고는 모두 적용가능 모델 성능 범위에 들었다. NMSE는 5가지 난류 스미드 수 모두에서 적용 가능한 수준에 들었으며, FAC2는 난류 스미드 수가 0.9인 경우를 제외하고는 모두 적용가능 모델 성능에 들었다. $X/H = 6$ 에서는 FB, NMSE, FAC2 모두에 대하여 5가지 난류 스미드 수 모두에서 적용가능 모델 성능 범위에 들었다. 총괄적으로는 평가 대상으로 사용한 3가지 파라미터 모두에서 난류 스미드 수 0.7이 가장 이상적인 값에 가까운 것으로 나타났다.

Table 1. Studied cases and atmospheric stability.

Cases	Pasquill's stability class	Monin-Obukhov length (L_{MO})
Case A	A (extremely unstable)	-10
Case B	B (moderately unstable)	-20
Case C	C (slightly unstable)	-50
Case D	D (neutral)	10^{10}
Case E	E (slightly stable)	50
Case F	F (moderately stable)	20

이상의 결과를 참조로 본 연구에서는 난류 스미드 수를 0.7을 사용하여 이후 연구를 진행하였다.

3.3 시뮬레이션 케이스의 선정

본 연구에서는 대기안정도 변화에 따른 농도장 변화를 평가하기 위하여 Jeong and Kim (2018)의 연구를 참고로 6가지 대기안정도 조건을 사용하였다. 표 1에는 본 연구에서 사용한 6가지 대기안정도에 따른 계산 CASE를 나타내었다. 표 1에 나타난 Pasquill 안정도 등급을 FLUENT 모델에서 입력할 때 이들 각 안정도에 해당하는 Monin-Obukhov 길이로 입력하였다.

3.4 대기안정도에 따른 유동장 변화

그림 6에는 대기안정도에 변화에 따른 X-방향 유속의 변화를 보기 위하여 중심선 단면 ($Z = 0\text{m}$)에서 X-방향 유속의 분포도를 나타내었다. 양의 유속의 크기

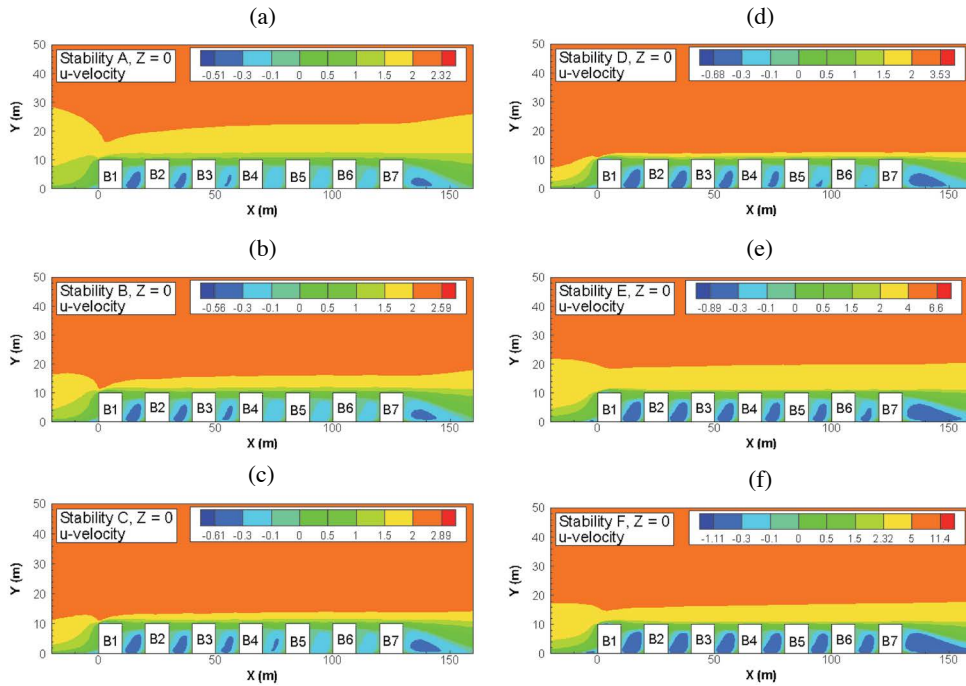


Fig. 6. Contours of x-velocity on the plane $Z=0$ m under different stability conditions.

는 강한 불안정(A)에서 2.32 m/s로 가장 낮은 값을 나타내었으며 안정(F)에서 11.4 m/s로 가장 높게 나타났다. 음의 유속은 건물 사이 거리(street)와 마지막 건물 하류 역류가 발생하는 영역에서 발생하였으며 이 값도 강한 불안정(A)에서 -0.51 m/s로 가장 낮은 값을 나타내었으며 안정(F)에서 -1.11 m/s로 가장 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 안정한 대기인 경우 건물 사이 거리에서 회전류 유속이 크기 때문에 다른 대기안정도 경우에 비하여 건물 사이의 공간에서 약취성 물질이 주변 공기와 혼합하는 확률이 증가함을 의미한다.

그림 7은 중심선 단면($Z=0$ m)에서 수직방향 유속(w)의 분포도를 나타내었다. 가장 큰 수직방향 양의 유속은 첫 번째 건물(B1)의 풍상 측 지붕 부근에서 나타났다. 건물 사이 공간 내의 수직방향 유속은 전체적으로 건물 후면에서 양의 값을 나타내고 건물 전면에서 음의 값을 나타내었다. 수직방향 양의 유속 크기는 안정(F) 대기에서 2.81 m/s로 가장 높게 나타났으며

불안정 대기(A)에서 1.59 m/s로 가장 낮은 값을 나타내었다. 수직방향 음의 유속 크기도 안정 대기에서 -1.56 m/s로 가장 높게 나타났으며 불안정 대기에서 -0.77 m/s로 가장 낮게 나타났다. 전체적으로 불안정 대기에서는 건물 사이에서 발견되는 유속이 음의 값을 갖는 경향은 하류로 갈수록 감소되고 있으나 안정 대기에서는 음의 유속 크기는 다른 안정도에 비해서 유사한 크기로 유지되는 것으로 나타났다.

그림 8에는 건물 중심선($Z=0$ m)을 따르는 방향으로 난류운동에너지의 분포도를 나타내었다. 모든 대기안정도에서 난류운동에너지의 최대값은 첫 번째 건물의 풍상 측 지붕 부근에서 발생하였다. 불안정 대기(A, B, C)에서 하류 방향으로 가면서 건물 사이의 거리 위치에서 난류운동에너지의 크기는 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 불안정 대기에서 하류로 갈수록 약취물질의 지표 부근으로 이동이 상대적으로 약화됨을 의미한다. 안정 대기(E, F)에서 난류운동에너지는 전체적으로 건물 지붕 부근에서 최대값을 나

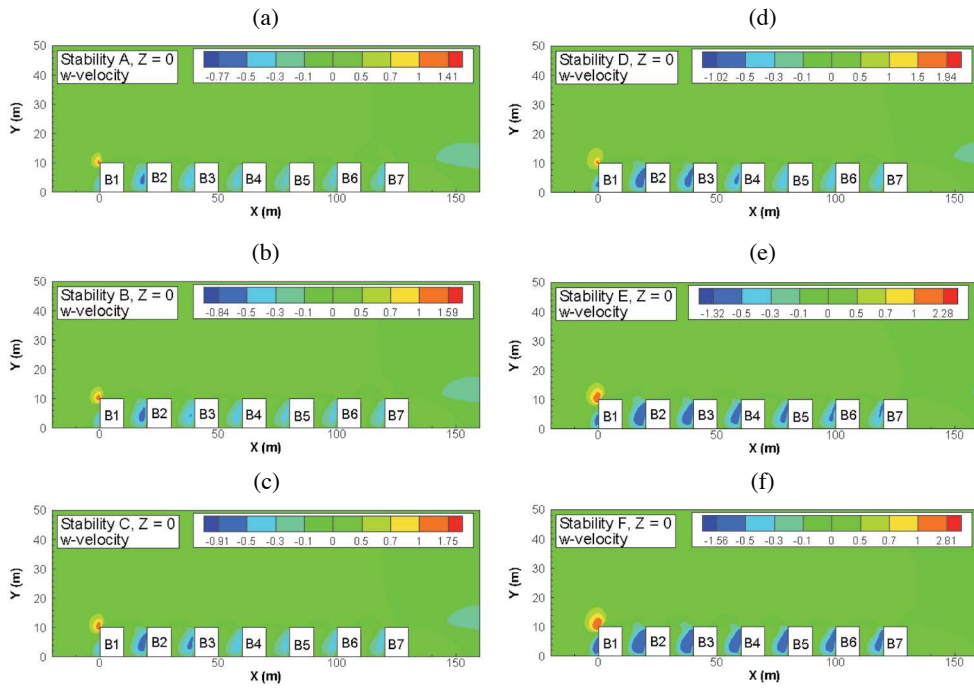


Fig. 7. Contours of w-velocity on the plane $Z = 0$ m under different stability conditions.

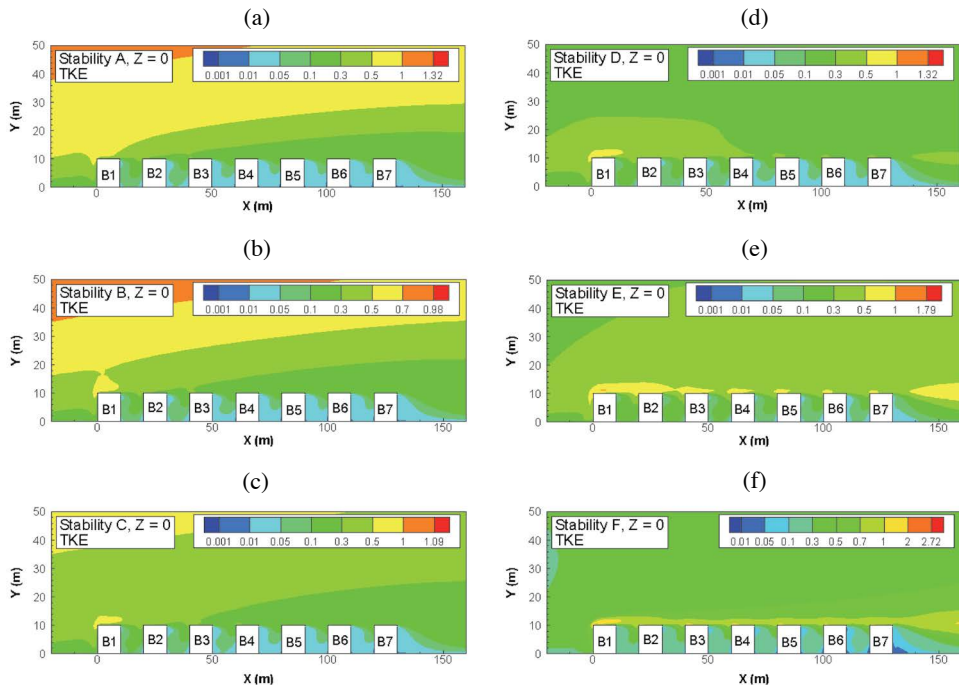


Fig. 8. Contours of turbulent kinetic energy on the plane $Z = 0$ under different stability conditions.

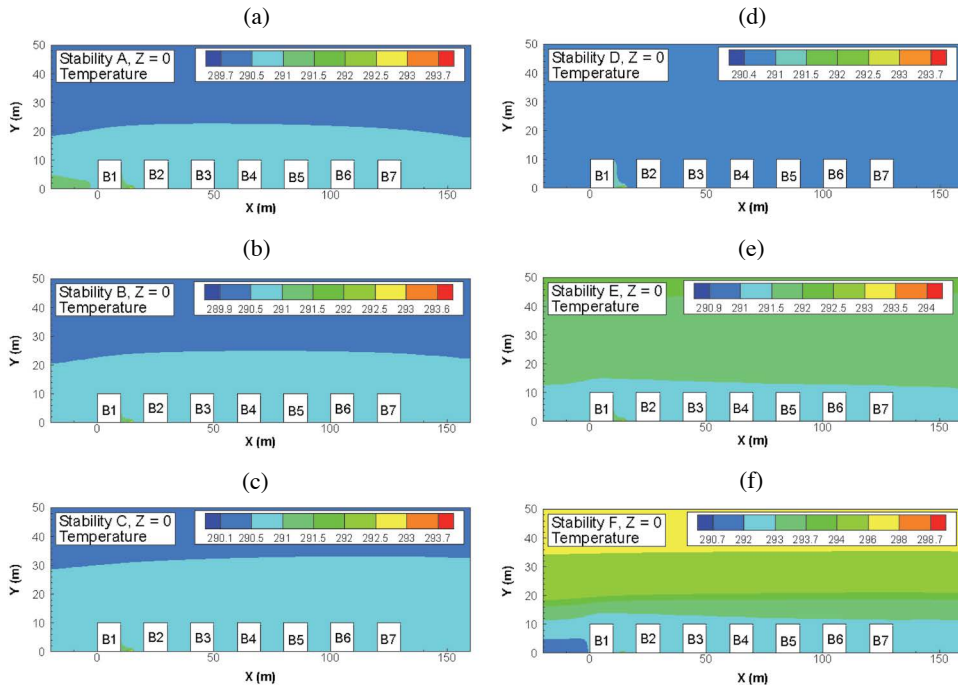


Fig. 9. Contours of temperature on the plane $Z=0$ m under different stability conditions.

타내었고 건물 사이의 공간에서 상대적 다른 안정도의 그것에 비하여 큰 값을 나타내었다.

그림 9에서는 건물 중심선 ($Z=0$ m) 을 따르는 방향으로 안정도에 따른 온도 분포를 나타내었다. 불안정 대기 (A, B) 일 때는 바닥 부근 온도가 높고 고공으로 갈수록 온도가 낮아지는 분포를 잘 나타내었다. 안정 대기 (E, F) 에서는 지표 부근 온도가 높고 고공으로 갈수록 온도가 감소하는 전형적인 온도 분포를 잘 나타내었다. 본 연구 결과는 강한 불안정 (A) 에서 지표 부근 유입구 온도가 하류방향으로 가면서 약간 감소하고 안정 대기 (F) 에서 지표 부근 유입구 온도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 바닥 경계조건으로 열플라스를 0 로 둔 것이 부분적인 이유로 생각된다. 중립 대기 (D) 의 경우 첫 번째 건물 (B1) 하류방향 벽면 부근에서 약간 높은 온도가 나타난 것은 배출원에서 배출 온도를 300 K 로 한 것이 원인으로 판단된다.

3.5 안정도에 따른 악취 농도 변화

그림 10에는 안정도에 따른 악취 플룸 (odor plume) 의 하류 방향 건물에 미치는 수직방향 영향을 보기 위하여 플룸 중심선 단면 ($Z=0$) 에서 악취농도의 분포를 나타내었다. 그림에서 OU 는 악취단위를 나타내고 1 OU 는 일반적으로 악취 감시단 (a team of panelists) 의 50% 인원 에 의하여 감지될 수 있는 악취농도를 나타낸다 (Lin *et al.*, 2007). 그림에서 나타낸 바와 같이 최대 수직방향 플룸 높이는 불안정 대기일 때 B1 건물 지붕 상부에서 발생하였다. B7 건물 옥상에서 수직방향 플룸 높이는 중립대기에서 최대값을 나타내었다.

그림 11에서는 지표 부근 ($Y=1$ m) 에서 악취 플룸의 단면도를 나타내었다. 전체적으로 안정도가 불안정, 중립, 안정으로 가면서 지표부근 플룸의 길이는 감소하였다. 안정 대기일 때 하류방향에 있는 건물 B4, B5, B6 부근에서 지표 부근 플룸의 횡방향 확산 폭이 약간 증대하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 안정 대기에서 지표부근에서 수직방향 확산은 불안정

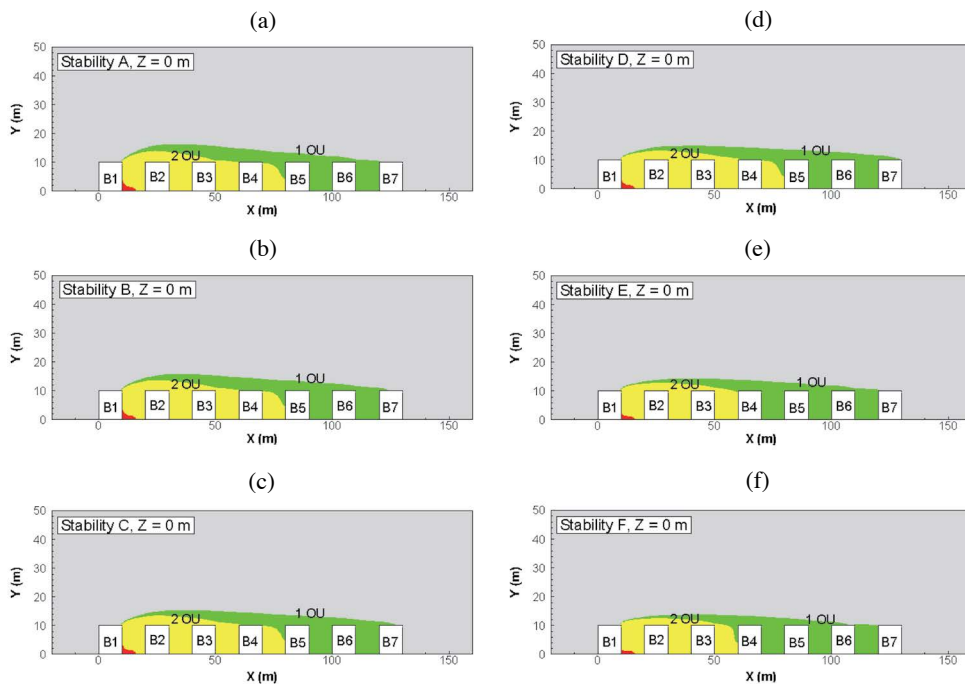


Fig. 10. Contours of Odor Unit on the plane Z = 0 m under different stability conditions.

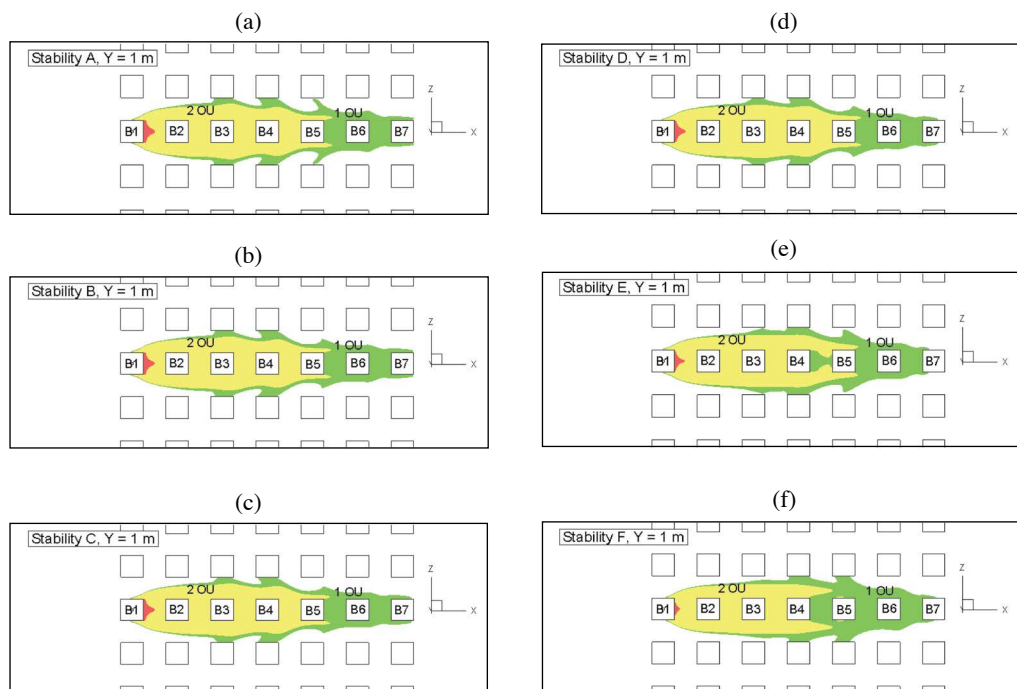


Fig. 11. Contours of Odor Unit on the surface level plane (Y = 1 m) under different stability conditions.

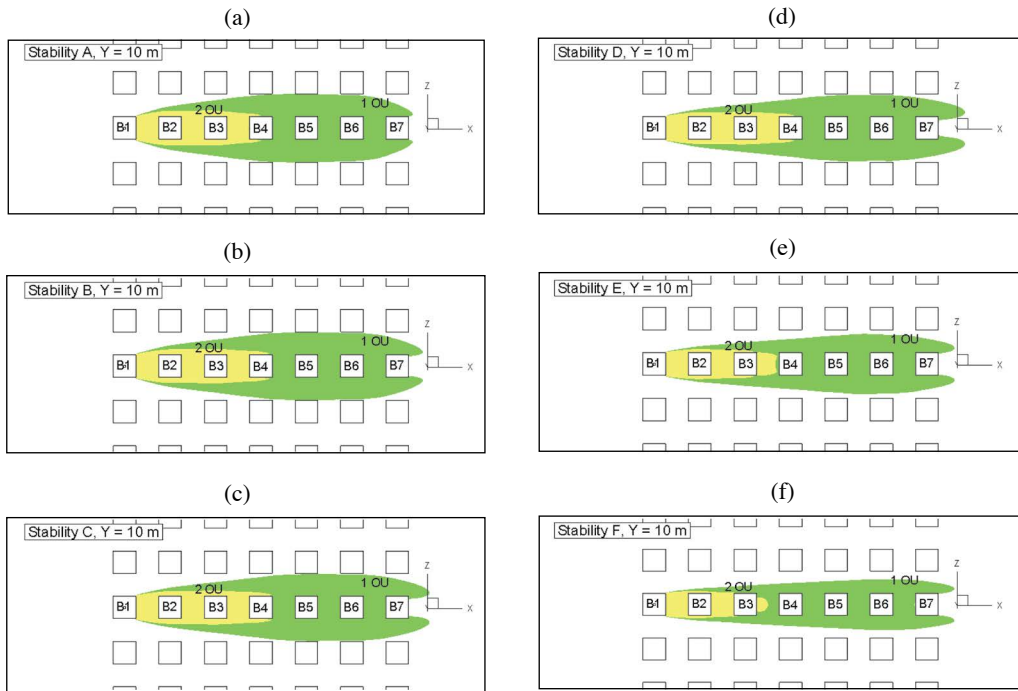


Fig. 12. Contours of Odor Unit on the building roof level ($Y = 10$ m) with different stability conditions.

대기일 때에 비하여 상대적으로 축소되고 하류 방향 쪽으로 가면서 지면 부근에서 횡방향으로 이동하는 양이 많아지기 때문으로 생각된다.

그림 12에는 건물 지붕 부근 ($Y = 10$ m)에서 악취 플룸의 단면도를 나타내었다. 지붕 부근 플룸의 폭은 불안정일 때가 가장 크고 안정으로 갈수록 감소하였다. 플룸의 하류 방향 길이는 강한 불안정(A)에서 가장 짧고 중립 대기에서 가장 긴 것으로 나타났다. 안정 대기에서 횡방향으로 확산이 감소하는 것은 지붕 높이에서 흐름방향(X 방향) 유속이 다른 안정도에서 보다 상대적으로 높아서 플룸의 하류 방향 이동이 잘 일어나기 때문으로 판단된다.

그림 13에서는 배출된 악취가 안정도에 따른 하류 건물에 미치는 영향 변화를 보기 위하여 건물 표면에서 악취농도 분포를 나타내었다. 전체 안정도에서 배출원 상류에 인접한 건물 B1의 하류 방향 벽면은 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 전체적으로 B1에서 B7 건물 모두 1 OU의 영향 범위에 속하며 B1에서

B5 건물은 2 OU 농도의 영향 범위에 드는 것으로 나타났다. 불안정 및 중립 조건에서는 B3, B4, B5, B6, B7 건물의 좌우 인접 건물 벽면에 1 OU의 농도가 형성되는 것으로 나타났다. 그러나 안정 조건에서는 B3 건물을 제외한 B4, B5, B6, B7 건물의 좌우 인접 건물 벽면에 1 OU 농도의 영향이 있는 것으로 나타났다. 배출원에서 가장 먼 하류에 있는 건물(B7)까지 가장 큰 영향을 주는 안정도는 중립(D)으로 나타났다.

4. 결 론

상용 CFD 모델인 FLUENT를 사용하여 건물 집합 지역에서 대기안정도 변화에 따른 지표 부근 점 배출원에서 배출되는 악취 확산에 따른 흐름방향의 악취 농도 변화를 모의하고 결과를 제시하였다. Chang and Hanna (2004)의 판정 기준에 따라 중립 대기조건에서 실험 자료를 이용하여 CFD 모델의 적용성을 검토하

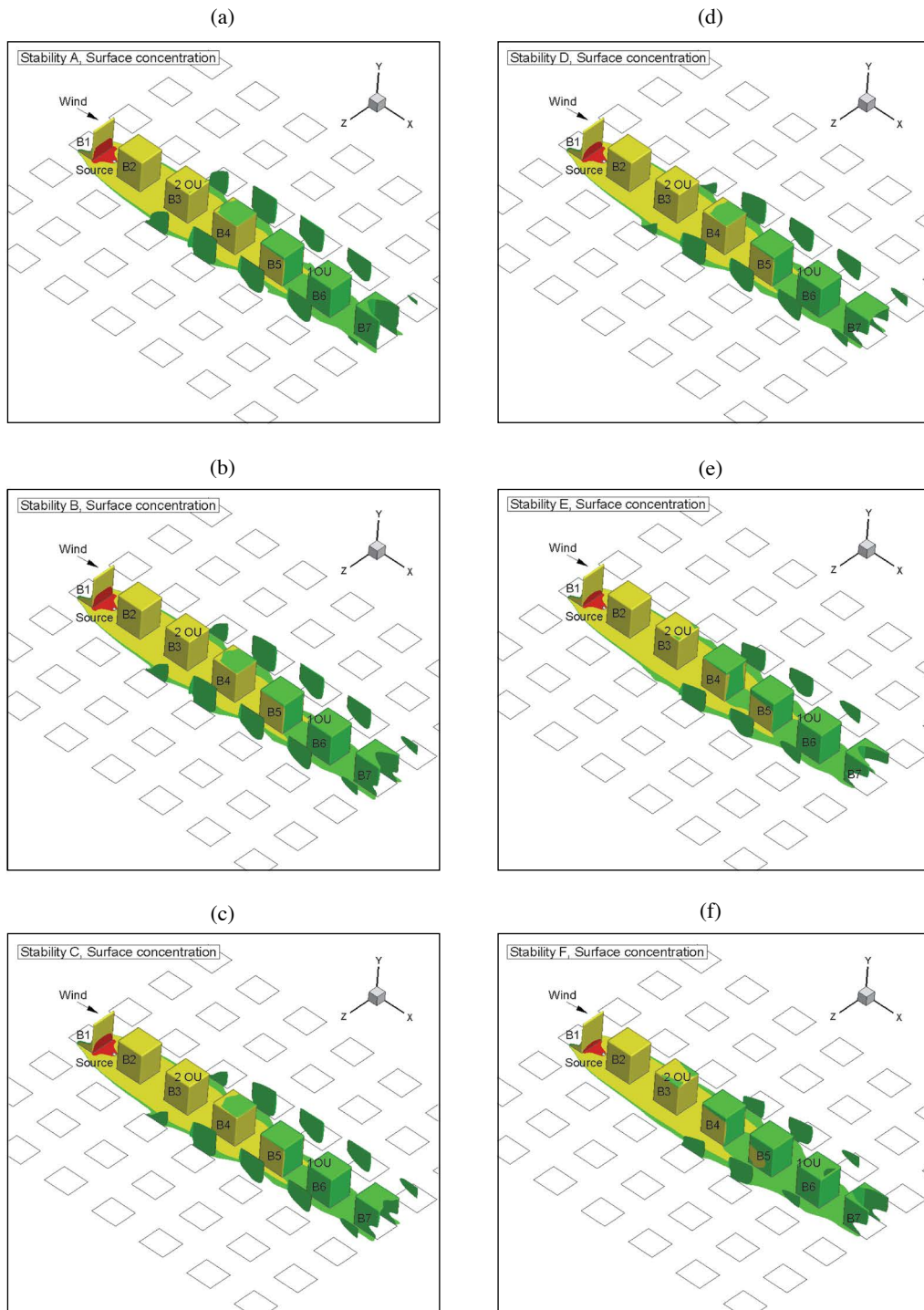


Fig. 13. Contours of Odor Unit on the surface under different stability conditions.

고 적정 난류 스미드 수를 평가하였다. 평가에서 구한 난류 스미드 수를 사용하여 6가지 대기안정도에 따른 흐름방향 건물 주변에서 형성되는 유동장과 악취농도 변화를 모의한 결과 다음을 알 수 있었다.

(1) 중립 대기 조건에서 FLUENT 모델의 계산 결과를 비교 대상 실험 자료의 무차원 농도 프로파일을 잘 모의하였고 실험 자료와 비교에서 구한 적정 난류 스미드 수는 0.7로 나타났다.

(2) 흐름방향 유속의 크기는 강한 불안정(A)에서 가장 낮은 값을 나타내었으며 안정(F)에서 가장 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 유입구 유속 프로파일이 안정도가 불안정에서 안정으로 가면서 고공에서 유속이 증대하기 때문에 판단된다. 수직방향 유속의 최대값은 전체 안정도에서 첫 번째 건물의 풍상 측 지붕 부근에서 나타났다.

(3) 모든 대기안정도에서 난류운동에너지의 최대값은 첫 번째 건물의 풍상 측 지붕 부근에서 발생하였다. 불안정 대기(A, B, C)에서 하류 방향으로 가면서 건물 사이의 거리 위치에서 난류운동에너지의 크기는 감소하는 경향을 보였다.

(4) 전체 안정도에서 지표에서 배출된 악취는 배출원 상류 건물 B1의 하류 방향 벽면 부근에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 안정도 중립(D)에서 가장 멀리 있는 건물까지 상대적으로 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

(5) 본 연구의 결과는 지표에 설치된 점 배출원에서 배출되는 악취에 대한 연구로 장래 다양한 배출조건(배출구 위치, 배출원 종류 등) 변화에 따른 악취 플룸의 이동에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2019학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

References

- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J. (2007) CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems, *Atmospheric Environment*, 41(2), 238-252, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>
- Brancher, M., Piringer, M., Franco, D., Filho, P.B., Lisboa, H.D.M., Schaubberger, G. (2019) Assessing the inter-annual variability of separation distances around odour sources to protect the residents from odour annoyance, *Journal of Environmental Sciences*, 79, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.09.018>
- Brown, M.J., Lawson, R.E., DeCroix, D.S., Lee, R.L. (2001) Comparison of Centreline Velocity Measurements Obtained around 2D and 3D Building Arrays in a Wind Tunnel, Report LA-UR-01-4138, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 7pp. https://www.researchgate.net/publication/236512119_COMPARISON_OF_CENTRELINE_VELOCITY_MEASUREMENTS_OBTAINED_AROUND_2D_AND_3D_BUILDING_ARRAYS_IN_A_WIND_TUNNEL
- Chang, J.C., Hanna, S.R. (2004) Air quality model performance evaluation, *Meteorology and Atmospheric, Physics*, 87(1-3), 167-196. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-003-0070-7>
- Conti, C., Guarino, M., Bacenetti, J. (2020) Measurements techniques and models to assess odor annoyance: A review, *Environment International*, 134, 105261. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105261>
- Dai, Y., Mak, C.M., Ai, Z., Hang, J. (2018) Evaluation of computational and physical parameters influencing CFD simulations of pollutant dispersion in building arrays, *Building and Environment*, 137, 90-107. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.005>
- Danuso, F., Rocca, A., Ceccon, P., Ginaldi, F. (2015) A software application for mapping livestock waste odour dispersion, *Environmental Modelling & Software*, 69, 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.03.016>
- de Melo, A.M.V., Santos, J.M., Mavroidis, I., Junior, N.C.R. (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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.017>
- Du, Y., Blocken, B., Pirker, S. (2020) A novel approach to simulate pollutant dispersion in the built environment: Transport-based recurrence CFD, *Building and Environ-*

- ment, 170, 106604. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106604>
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B. (2007) Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. https://www.researchgate.net/publication/257762093_Best_Practice_Guideline_for_the_CFD_Simulation_of_Flows_in_the_Urban_Environment
- Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Krüs, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., Miles, S.D., Wisse, J.A., Wright, N.G. (2004) Recommendations on the use of CFD in wind engineering. In: van Beeck, J.P.A.J. (Ed.), Proceedings of the international conference on urban wind engineering and building aerodynamics. COST action C14, impact of wind and storm on city life built environment. Von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium, 5-7 May 2004. https://www.researchgate.net/publication/251814717_Recommendations_on_the_use_of_CFD_in_wind_engineering
- Gorlé, C., van Beeck, J., Rambaud, P. (2010) Dispersion in the wake of a rectangular building: validation of two Reynolds-averaged Navier-Stokes modelling approaches, *Boundary-Layer Meteorology*, 137, 115. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10546-010-9521-0>
- Gualtieri, C., Angeloudis, A., Bombardelli, F., Jha, S., Stoesser, T. (2017) On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows, *Fluids*, 2(2), 17. <https://doi.org/10.3390/fluids2020017>
- Guo, D., Zhao, P., Wang, R., Yao, R., Hu, J. (2020) Numerical simulations of the flow field and pollutant dispersion in an idealized urban area under different atmospheric stability conditions, *Process Safety and Environmental Protection*, 136, 310-323. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.031>
- Hilderman, T., Chong, R. (2007) A Laboratory Study of Momentum and Passive Scalar Transport and Diffusion within and above a Model Urban Canopy. DRDC Suffield CR 2008-025, Defence R&D Canada, Suffield, Ralston, Alberta. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1003970.pdf>
- Hong, S., Lee, I., Hwang, H., Seo, I., Bitog, J., Kwon, K., Song, J., Moon, O., Kim, K., Ko, H. (2011a) CFD modelling of livestock odour dispersion over complex terrain, part I: Topographical modelling, *Biosystems Engineering*, 108, 253-264. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.12.009>
- Hong, S., Lee, I., Hwang, H., Seo, I., Bitog, J., Kwon, K., Song, J., Moon, O., Kim, K., Ko, H., Chung, S. (2011b) CFD modelling of livestock odour dispersion over complex terrain, part II: Dispersion modelling, *Biosystems Engineering*, 108, 265-279. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.12.008>
- Jeong, S.J. (2017) A CFD Study of Near-field Odor Dispersion around a Cubic Building from Rooftop Emissions, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 11(3), 153-164. <https://doi.org/10.5572/ajae.2017.11.3.153>
- Jeong, S.J., Kim, A.R. (2018) CFD Study on the Influence of Atmospheric Stability on Near-field Pollutant Dispersion from Rooftop Emissions, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 12(1), 47-58. <https://doi.org/10.5572/ajae.2018.12.1.047>
- Lin, X.J., Barrington, S., Choinière, D., Prasher, S. (2007) Simulation of the effect of windbreaks on odour dispersion, *Biosystems Engineering*, 98(3), 347-363. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.07.010>
- Lin, X.J., Barrington, S., Choinière, D., Prasher, S. (2009) Effect of weather conditions on windbreak odour dispersion, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97, 487-496. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.06.012>
- Longo, R., Fürst, M., Bellemans, A., Ferrarotti, M., Derudi, M., Parante, A. (2019) CFD dispersion study based on a variable Schmidt formulation for flows around different configurations of ground-mounted buildings, *Building and Environment*, 154, 336-347. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.041>
- Maïzi, A., Dhaouadi, H., Bournot, P., Mhiri, H. (2010) CFD prediction of odorous compound dispersion: Case study examining a full scale waste water treatment plant, *Biosystems Engineering*, 106, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.02.005>
- Oettl, D., Kropsch, M., Mandl, M. (2018) Odour assessment in the vicinity of a pig-fattening farm using field inspections (EN 16841-1) and dispersion modelling, *Atmospheric Environment*, 181, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.029>
- Pieterse, J.E., Harms, T.M. (2013) CFD investigation of the atmospheric boundary layer under different thermal stability conditions, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 121, 82-97. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.014>
- Tan, W., Li, C., Wang, K., Zhu, G., Wang, Y., Liu, L. (2018) Dispersion of carbon dioxide plume in street canyons, *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.01.020>
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T. (2008) AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind

environment around buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1749-1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>

Tominaga, Y., Stathopoulos, T. (2018) CFD simulations of near-field pollutant dispersion with different plume buoyancies, *Building and Environment*, 131, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.008>

doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.008

Authors Information

정상진 (경기대학교 환경에너지공학과 교수)