

격자볼츠만 아격자 모델을 이용한 난류 경계층 내에서의 오염물질 확산에 대한 수치적 연구

신명섭* · 변성준* · 김준형* · 윤준용***

* 한양대학교 기계공학과, ** 한양대학교 기계정보경영공학부

Numerical Investigation of Pollutant Dispersion in a Turbulent Boundary Layer by Using Lattice Boltzmann-Subgrid Model

Myung Seob Shin*, Sung Jun Byun*, Joon Hyung Kim*, and Joon Yong Yoon***

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

** Division of Mechanical and Management Engineering, Hanyang Univ.

(Received July 21, 2010 ; Revised November 22, 2010 ; Accepted November 23, 2010)

Key Words: Two-Phase Turbulent Flow(2상 난류유동), Pollutant(오염물질), Subgrid Scale Model(SGS 모델), Lattice Boltzmann Method(격자볼츠만 방법)

초록: 격자볼츠만 방법(LBM)을 이용하여 난류 경계층에서의 오염물질 확산에 대하여 수치계산을 수행하였다. 난류 경계층 내의 유동을 모사하기 위하여 격자볼츠만 방법에 Smagorinsky 아격자 모델을 적용한 LB-SGS 모델을 사용하였으며, 오염물질의 확산을 모사하기 위하여 Passive-scalar 방법을 적용하였다. LB-SGS 모델의 신뢰성 검증을 위하여 Fackrell & Robins(1982)과 Raupach & Legg(1983)의 실험 조건과 동일한 조건하에서 수치계산을 수행하였고, 수치계산으로 얻어진 농도 분포를 실험값과 비교하였다. 이 결과로부터 LB-SGS 모델이 난류 경계층 내에서의 오염물질의 농도분포를 예측하는데 적합한 모델임을 알 수 있었다.

Abstract: The dispersion of a pollutant in a turbulent boundary layer has been described in this study by using a two-dimensional lattice Boltzmann method (LBM) and the Smagorinsky sub-grid-scale (SGS) model. The scalar transport equation corresponding to the pollutant concentration is adopted; the pollutant is considered to be in a continuous phase. The pollutant source is classified as ground-level source (GLS) and elevated-point source (ES). Air velocity and particle concentration profile for the pollutant are compared with the respective results and profiles obtained in the experiments of Fackrell and Robins (1982) and Raupach and Legg (1983). The numerical results obtained in this study, i.e., the simulation and the experimental data for the mean flow velocity profiles and the pollutant concentration profiles, are in good agreement with each other.

- 기호설명 -

c : LBM에서의 격자 속도
 c_i : LBM에서의 속도 벡터
 C_{sma} : Smagorinsky 상수
 D_{fg} : 확산계수
 f_i, g_i : 각 유체의 분포함수
 f_i^{eq}, g_i^{eq} : 각 유체의 평형분포 함수
 H : 경계층 높이
 H_s : 오염 분출원 높이

x_s : 오염 분출원으로부터의 x방향 거리
 ν_t : 와 점성계수
 ν_{tot} : 유효 점성계수
 τ : 완화 시간
 τ_{tot} : 유효 완화 시간
 Ω_i : 충돌 연산자
 w_i : 가중치 상수

1. 서론

환경오염 문제는 현재 인류에게 직면한 가장 큰 문제들 가운데 하나이다. 인류가 생존해 나가

† Corresponding Author, joyoon@hanyang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

기 위해서는 산업 활동에 따른 환경오염을 최소화해야 하고 그에 따른 수많은 연구과제들이 수행되고 있다. 대표적으로 대규모 공단의 최적위치 선정, 발전소 및 공장에서 배출된 오염물질에 의한 대기오염 방지대책의 수립, 도시환경과 관련된 제반 대기오염문제의 해결, 도심지역에서의 대기오염 확산 분포 등의 연구가 진행되어 왔고 앞으로도 막대한 시간과 자금이 소요될 전망이다. 공장지대 등 오염물질의 배출이 불가피한 경우, 주변지역의 피해를 막기 위해 대기유동에 의해 주변지역으로 확산되는 오염물질 농도를 환경기준치 이하로 유지하여야 한다. 따라서 대기 중 오염물질 확산에 의한 환경영향의 신뢰성 있는 평가 방법이 필수적으로 요구된다. 이러한 요구에 부응하여 최근까지 많은 연구자들이 오염물질의 확산 및 분포를 예측하기 위한 실험 및 수치모델에 관하여 연구하였다.

대표적으로 Fackrell and Robins⁽¹⁾은 난류경계층 영역에서 오염물질의 확산 및 분포에 관한 실험적 연구를 통하여 속도장, 농도장 및 난류특성 값들을 측정하였다. 이 실험 자료는 이후로 많은 연구자들에 의해서 비교 자료로 사용되고 있다. Raupach and Legg⁽²⁾는 연기가시화 실험을 통해서 연기의 수직 농도분포를 측정하였으며, 난류량의 변화를 측정하여 Fackrell and Robins의 결과와 비교하였다.

수치적인 연구로는 Bringfelt⁽³⁾이 유한체적법(FVM)을 기반으로 하는 Phoenix code를 사용하여 굴뚝이 있는 공장건물 주위의 유동장과 농도장을 해석하였는데, 연기가시화 실험과 Gaussian Dispersion 공식에 의한 결과와 정성적 비교를 하였다. Serag-Eldin⁽⁴⁾은 준 3차원 정상유동모델과 3차원 농도모델을 사용하여 오염물질 배출원을 갖는 긴 직육면체 근처에서 유동장과 농도장을 계산하였다. 직교좌표계를 이용한 유한차분법(FDM)을 이용하였으며, 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 유동장을 해석하였지만 실험결과에 대한 비교는 이루어지지 않았다. 국내에서는 Kim⁽⁵⁾이 평판 및 복잡지형에서 오염물질 확산을 수치적으로 계산하였다. 오염물질이 유동장에 어떤 영향을 미치지 않는다는 가정을 사용하였으며, 난류 유동장을 해석하기 위해서 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 구배확산이론(K-theory)을 도입하여 난류확산을 모델링하였으며, 이때 난류 슈미트(Schmidt, Sc) 수는 0.8의 경험적인 값을 사용하였다. Park and Park⁽⁶⁾은 복잡지형에서 저 레

이놀즈수 $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 대기오염물질의 확산을 연구하였으며, 유한차분법(FDM)을 이용하여 수치 계산하였다. 이때의 난류 Sc수는 0.7의 값을 사용하였다. Kang 등⁽⁷⁾은 평판에서 오염물질의 확산 및 난류강도에 대하여 수치적으로 연구하였다. 농도에 따라 난류강도를 조절하는 수정된 $k-\omega$ 모델을 사용하였으며, 난류 Sc수는 0.7의 값을 사용하였다. 하지만 위에 언급된 수치적 연구들은 실험값과의 비교가 이루어지지 않았거나 실제 실험값과 비교한 경우도 농도가 급격하게 변화하는 오염 배출원 근처에서는 오차가 발생하였다.

난류 경계층 내에서의 오염물질의 확산에 대한 연구는 우선 정확한 난류 경계층내의 유동장에 대한 해석이 뒷받침되어야 한다. 기존의 수치적 연구들은 정확한 난류를 파악하기 위하여 DNS (Direct Numerical Simulations), LES(Large Eddy Simulations), RANS(Reynolds-averaged Navier- Stokes)계열 등의 여러 가지 난류모델링(turbulence modeling)을 고안 및 적용하고 있다.⁽⁸⁾ 특히 난류는 현상 자체가 매우 복잡하고 예측이 어렵기 때문에 이를 해석하기 위해서는 미세한 구조까지 고려해야한다. 이러한 이유 때문에 기존의 연속체(continuum) 가정을 통한 Navier-Stokes 방정식을 이용한 방법은 난류 유동장을 직접 수치계산하기 위해서는 여러 어려움이 존재한다.⁽⁹⁾ 한편 격자볼츠만 방법(LBM)은 유체입자들의 거동을 운동학 이론(kinetic theory)을 토대로 통계적으로 모사하려는 Boltzmann 방정식을 각각의 차분화된 공간격자와 단순화된 속도벡터로 이산화하여 각각의 공간격자에서의 분포함수 변화를 통해 유체의 거시적 변수(속도, 압력 등)들을 결정하는 수치해석 방법으로 미시적(microscopic)인 현상으로부터 미시적인 구조의 해석이 중요한 난류 유동장의 해석에 매우 유효하게 접근이 가능하다.⁽¹⁰⁾ 이러한 장점을 가진 LB-LES 방법은 기존의 NS-LES 방법보다 난류 구조를 보다 정확하게 구현한다고 Yu 등⁽¹¹⁾ 연구에 의하여 알려져 있다.

본 연구에서는 입자들의 거동을 통계적으로 모사하는 격자볼츠만 방법(LBM)에 정확한 난류 유동장을 예측하기 위하여 큰 에디 모사(LES)를 적용한 격자볼츠만 아격자(LB-SGS) 모델을 사용하였다. 오염 분출원(source point emission)이 바닥면(GLS)에서 방출할 때와 바닥에서 떨어진 지점(ES)에서 방출할 때의 오염 물질의 농도 확산을 수치계산하기 위하여 Passive Scalar 방법을 사용

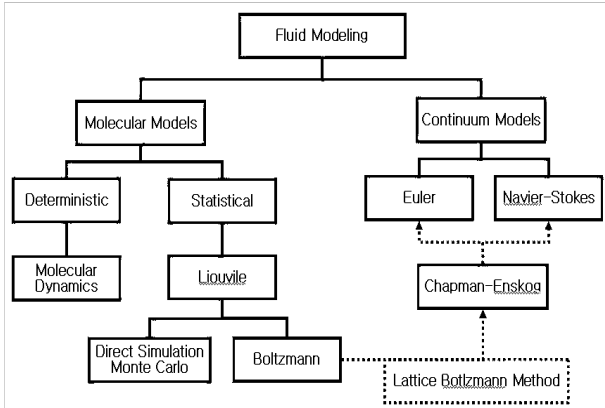


Fig. 1 Molecular and continuum flow models

하였다. LB-SGS 모델의 신뢰성 검증을 위하여 비교 대상 실험 조건과 동일한 조건하에서 수치 계산을 수행하였고, 계산으로 얻어진 농도분포 결과를 실험값과 비교하였다. 그리고 그에 따른 결과 값들을 분석하여 난류 경계층 내에서의 오염물질의 확산을 해석할 수 있는 신뢰성 있는 수치 모델을 제시하고자 한다.

2. 격자 볼츠만 방법(LBM)

일반적으로 유동현상에 대한 수치적 연구는 Fig. 1과 같이 유체를 보는 관점에 따라서 여러 가지 방법들로 연구가 진행되어 왔다. 기존의 거시적(macroscopic) 모델들은 Navier-Stokes 방정식을 이산화하는 방법으로 사용하는 반면에 격자볼츠만 방법(LBM)은 미시적 관점(microscopic)과 거시적 관점의 중간(mesoscopic) 형태로 운동학 이론(kinetic theory)을 기반으로 하는 볼츠만 방정식을 이용하여 유체입자의 확률 분포 변화를 통해 유동을 모사하는 새로운 수치해석 방법이다.⁽¹²⁾ 기존의 거시적 관점의 유동해석 모델들은 비선형적인 편미분방정식(P.D.E)을 이산화하여 수치해석을 수행하는 것에 반하여, LBM은 선형적인 형태로 이루어져 있어서 기존의 방법보다는 계산과정이 매우 간단한 장점이 있다. 그리고 각각의 분자들을 계산하는 DSMC(Direct Simulation Monte Carlo) 방법보다는 계산량이나 계산시간, 컴퓨팅 파워가 적어 매우 경제적인 모델이고, 압력을 상태방정식으로 구할 수 있기 때문에 포와송(Poisson) 방정식을 이용해야하는 기존의 CFD방법보다는 매우 간단하다. 또한, 계산과정이 각각의

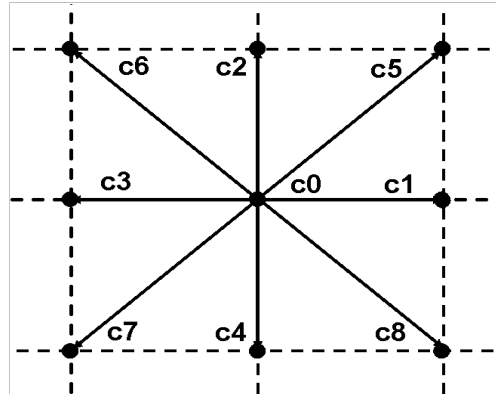


Fig. 2 Velocities vector of D2Q9 model.

격자점에서 이루어지므로 다수의 컴퓨터를 병렬화하여 사용하는데 용이하다. 이러한 특징을 가지고 있는 격자 볼츠만 방법은 미소유동(micro-flow),⁽¹³⁾ 다공질(porous medium) 내부와 다상유동(multi-phase flow)의 유동해석 등 여러 가지 복잡한 유동(complex flows)⁽¹⁴⁾을 다루는 분야에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다.

2.1 격자 볼츠만 방정식(LBE)

본 연구에서는 격자볼츠만 방법 중 lattice BGK D2Q9 모델을 사용하였다. D2Q9은 2차원이며 위치는 Fig. 2처럼 각 격자점에만 있을 수 있으며, 속도벡터는 정지되어 있는 것을 포함하여 총 9개의 성분으로 이루어져 있다.

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = \Omega_i(x, t) \quad (1)$$

$$\Omega_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (2)$$

여기에서 f_i 는 i 방향의 입자분포 함수 값이고, τ 는 완화시간(relaxation time), f_i^{eq} 는 각 격자점의 평형 분포 함수를 뜻한다. $\Omega_i(x, t)$ 는 충돌식이며 Bhatnagar, Gross, and Krook⁽¹⁵⁾은 단일완화시간(single relaxation time;SRT, τ)을 사용하여 단순한 형태의 충돌 식을 제안하였다.

식 (1)과 식 (2)을 통하여, 식 (3)과 같은 lattice BGK D2Q9 식을 표현할 수 있다.

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (3)$$

식 (3)에서 속도벡터 c_i 는 다음과 같다.

$$c_i = \begin{cases} c \left[\cos\left(\frac{i-1}{2}\pi\right), \sin\left(\frac{i-1}{2}\pi\right) \right] & \text{for } i = 1 \sim 4 \\ \sqrt{2}c \left[\cos\left(\frac{i-1}{2}\pi\right), \sin\left(\frac{i-1}{2}\pi\right) \right] & \text{for } i = 5 \sim 8 \end{cases} \quad (4)$$

여기에서 c 는 격자의 속도이며, LBM에서는 일반적으로 등간격 정렬격자(structured grid)를 사용하기 때문에 보통 1로 가정한다. 식 (3)에서의 평형분포 함수 $f_i^{eq}(x, t)$ 는 Maxwell 분포를 속도에 대해 Taylor 전개하여, 속도의 2차항까지 나타내며, 식 (5)와 같은 형태로 정의한다.

$$f_i^{eq}(x, t) = \omega_i \rho \left[1 + 3 \frac{c_i \cdot \vec{u}}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(c_i \cdot \vec{u})^2}{c^4} - \frac{3}{2} \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{c^2} \right] \quad (5)$$

식 (5)의 ρ 는 유체의 밀도이며, \vec{u} 는 유동속도를 뜻하며, 각 지점의 ω_i 는 가중치(weighting) 상수로서 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_0 = 4/9 \\ \omega_{1 \sim 4} = 1/9 \\ \omega_{5 \sim 8} = 1/36 \end{cases} \quad (6)$$

각 격자점에서의 유체 밀도와 운동량은 다음과 같이 분포함수의 합으로 나타낸다.

$$\rho(x, t) = \sum_i f_i(x, t) \quad (7)$$

$$\rho(x, t) \vec{u}(x, t) = \sum_i c_i f_i(x, t) \quad (8)$$

LBM에서의 압력은 식 (9)와 같은 상태방정식으로 표현되며, 동점성계수(ν)는 식 (10)과 같이 완화시간(τ)의 함수로 정의된다.

$$p(x, t) = C_s^2 \rho, \quad C_s^2 = c^2/3 \quad (9)$$

$$\nu = \frac{2\tau - 1}{6} \quad (10)$$

또한, LBM에서의 레이놀즈(Reynolds, Re) 수는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$Re = \frac{6 U_l N_l}{2\tau - 1} \quad (11)$$

여기서 U_l 은 유체속도, N_l 은 특성길이에 대한 LBM에서의 격자수, τ 는 완화시간을 의미한다.

그리고 LBM에서의 한 계산시간(t)에 대한 계산 단계는 충돌(collision) 단계와 이류(stream) 단계로 구분할 수 있다. 충돌은 식 (2)의 충돌 연산자를 계산하는 단계이며, 이류는 충돌 연산자에서 구해진 새로운 분포함수를 다음 격자점으로 분산시켜 주는 단계이다. 이 두 단계가 끝나고 계산영역의 경계에서 경계조건을 계산하는 것으로 격자 볼츠만 방법의 계산이 마무리 된다.

2.2 격자 볼츠만 아격자(LB-SGS) 모델

LBM에서의 완화시간(τ) 값은 Navier-Stokes 방정식의 점성계수와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이 값으로 유동의 조건을 결정할 수 있다. 그러나 기존의 LBM에서는 식 (10)와 같이 완화시간(τ) 값의 범위가 한정되어 있었다. 즉, 완화시간(τ) 값이 0.5보다 작게 되면 점성계수(ν) 값이 음의 값이 되기 때문에 완화시간(τ)의 값이 항상 0.5보다 커야하는 제한 조건이 있다. 그리고 완화시간(τ)의 값이 0.5에 가까워질수록 수치계산의 불안정성이 증가하는 문제점 때문에 작은 점성계수(ν)를 통해 난류 유동해석에 적용하기에는 어려움이 발생한다.

이와 같이 LBM에서의 난류 유동해석의 단점을 보완하기 위하여 Hou 등⁽¹⁶⁾에 의해서 격자 볼츠만 아격자 (Lattice Boltzmann-Subgrid Scale, LB-SGS) 모델이 제안되었으며, 기존의 큰 에디 모사 (LES)중 가장 많이 이용되고 있는 Smagorinsky⁽¹⁷⁾ 모델을 LBM에 적용한 방법이다.

기존의 Smagorinsky 모델은 다음과 같이 유체의 점성계수(ν_0)와 eddy에 의해 발생하는 와점성계수(eddy viscosity, ν_t)로 유효 점성계수(ν_{tot})를 표현한다.

$$\nu_{tot} = \nu_0 + \nu_t = \nu_0 + (C_{sma} \Delta)^2 |S| \quad (12)$$

식 (10)을 완화시간(τ)에 대하여 정리하고, 식 (12)를 적용하면, τ_{tot} 은 식 (13)와 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_{tot} = 3 \left\{ \nu_0 + (C_{sma} \Delta)^2 |S| \right\} + \frac{1}{2} \quad (13)$$

여기에서의 C_{sma} 는 0.1차수를 갖는 실험적인 Smagorinsky 상수이며 Δ 는 계산영역에서의 격자 (lattice)의 크기, $|S|$ 는 변형률 텐서의 양으로 다음과 같다.

$$|S| = \sqrt{2S_{\alpha\beta}S_{\alpha\beta}}, \quad S_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial \bar{u}_\beta}{\partial x_\alpha} \right) \quad (14)$$

식 (13)에서 나타난 바와 같이 τ_{tot} 의 값이 ν_0 에 관계없이 항상 0.5 이상의 값을 갖게 된다. 그러므로 ν_0 의 범위가 유동적일 수 있다. 그에 따라 작은 ν_0 값을 적용하여 높은 Re수의 난류유동에 대한 계산이 LBM에서 가능하게 되었다.

2.3 격자 볼츠만 방법에서의 대류-확산 방정식

본 연구에서는 두 물질의 질량이 같고 두 물질 사이의 상호작용이 없다고 가정한 Passive Scalar 방법을 사용하였다. 전체에 대한 유체속도는 첫 번째 성분의 분포함수(f_i)를 통해 표현되며, 농도 확산을 해석하기 위한 농도의 분포함수(g_i)는 식 (3)과 같은 형태로 식 (15)와 같이 정의된다.

$$g_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) - g_i(x, t) = -\frac{1}{\tau_g} [g_i(x, t) - g_i^{eq}(x, t)] \quad (15)$$

여기서 τ_g 는 두 번째 성분의 완화시간이며, $g_i^{eq}(x, t)$ 는 농도에 대한 평형분포 함수로서 식 (5)과 비슷한 형태로 다음과 같이 정의한다.

$$g_i^{eq}(x, t) = \omega_i \rho_g \left[1 + 3 \frac{c_i \cdot \vec{u}}{c^2} \right] \quad (16)$$

식 (16)의 ρ_g 는 농도이며, \vec{u} 는 첫 번째 물질의 유동속도를 뜻하며, 각 지점의 ω_i 는 가중치 (weighting) 상수로서 식 (6)과 같은 값을 갖는다.

또한, 식 (16)을 Champman-Enskog 전개하면, 식 (17)과 같이 대류-확산 방정식을 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C\vec{u}) = \nabla \cdot (D_{fg} \nabla C) \quad (17)$$

여기서 D_{fg} 는 첫 번째 유체성분과 두 번째 유체성분간의 확산계수이다.

확산에 의한 농도는 식 (7)과 같은 형태로 각 격자점에서의 농도 분포함수의 합으로 나타낸다.

$$\rho_g(x, t) = \sum_i g_i(x, t) \quad (18)$$

그리고 확산(Diffusivity, D_{fg})과 점성(Kinematic Viscosity, ν)의 비로 슈미트(Schmidts, Sc) 수가 정해지며, LBM에서는 다음과 같이 정의한다.

$$Sc = \frac{\nu}{D_{fg}} = \frac{(2\tau - 1)/6}{(2\tau_g - 1)/6} = \frac{2\tau - 1}{2\tau_g - 1} \quad (20)$$

여기서 τ 은 첫 번째 유체의 완화시간을 뜻하며, τ_g 는 두 번째 유체의 완화시간을 말한다. 즉, LBM에서의 Sc수는 서로 다른 유체성분의 완화시간의 비로 정의된다.

3. 수치계산 방법

3.1 실험 조건

LB-SGS 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 수치계산된 결과를 Fackrell and Robins⁽¹⁾과 Raupach and Legg⁽²⁾의 실험 결과와 비교하였다. Fackrell and Robins은 평판 상에서 프로판과 헬륨의 혼합 가스를 바닥 면(Ground-Level Source, GLS)과 바닥에서 떨어진 지점에서 방출할 때(Elevated point Source, ES)의 오염물질 분포에 대하여 실험하였으며, Raupach and Legg는 평판 상에 위치한 선분출원(line source)에서 배출되는 수동 스칼라(passive scalar)양의 확산에 대해 실험하고, 이에 대한 수직분포를 구하였다. 위의 두 가지 실험에 대한 유동조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Flow conditions

	Fackrell and Robins (1982)	Raupach and Legg (1983)
Boundary-layer height (H)	1200mm	540mm
Source emission height (Hs)	GLS	0H
	ES	0.19H
Mean velocity(Ue) at boundary-layer height(H)	4m/s	11m/s
Reynolds No.(UeH/ν)	3.287×10 ⁵	4.0×10 ⁵

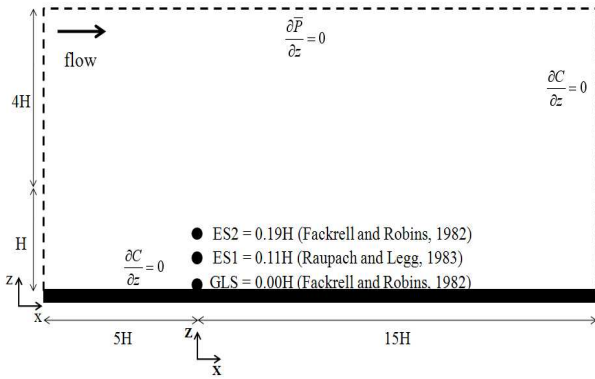


Fig. 3 Schematic diagram of numerical domain

3.2 수치계산 조건

2차원에서의 난류 경계층 유동을 모사하기 위하여 격자 볼츠만 아격자(LB-SGS) 모델을 사용하였으며, 오염 분출원(source point emission)이 바닥면(GLS)과 바닥에서 떨어진 지점(ES)에서 방출할 때의 오염물질의 농도 확산을 수치계산하기 위하여 Passive Scalar 방법을 사용하였다.

Fig. 3처럼 계산영역은 오염 분출원을 기준으로 입구는 난류경계층 높이(H)의 5H, 출구는 15H, 그리고 상층부는 지면으로부터 5H로 구성하였다. LBM에서의 경계조건은 기존의 CFD 방법에서 사용하는 방법을 그대로 적용할 수 없어서 본 연구에서는 바닥면에 점착(No-Slip)하는 조건으로 2차 정확도를 가진 “mid-grid bounce-back scheme”과 계산영역의 상층부는 대칭(symmetry) 조건을 사용하였다.⁽¹⁸⁾ 그리고 입·출구 조건은 채널에서의 완전 발달 난류유동의 조건을 만족시키기 위하여 주기적인(periodic) 경계조건을 사용하여 경계층 높이(H)를 모사하여, 오염 분출원인 GLS(Hs= 0H), ES1(Hs=0.11H), ES2(Hs=0.19H)의 위치와 Re수 등은 실험조건(Table.1)을 적용하여 수치 계산하였다. 또한, 오염물질에 대한 농도 경계조건으로는 바닥면은 바닥표면과 물질전달이 이루어지지 않는다고 가정하여 Neumann ($\partial C/\partial z = 0$) 조건을 사용하였으며, 일반적으로 난류 슈미트(turbulent Schmidt, Sc_t) 수는 유동의 난류특성 및 물질의 확산특성에 따라 0.7 ~ 0.9의 값⁽¹⁹⁾을 사용하는데, 본 연구에서는 Fackrell and Robins⁽¹⁾이 제시한 $Sc_t = 0.8$ 의 값을 사용하였다.

본 연구에서는 수직방향(z축)으로 난류경계층 높이(H)에 50 ~ 200개의 lattice로 격자 의존도 검사를 수행하였으며, Fig. 4처럼 100개 이상인 경

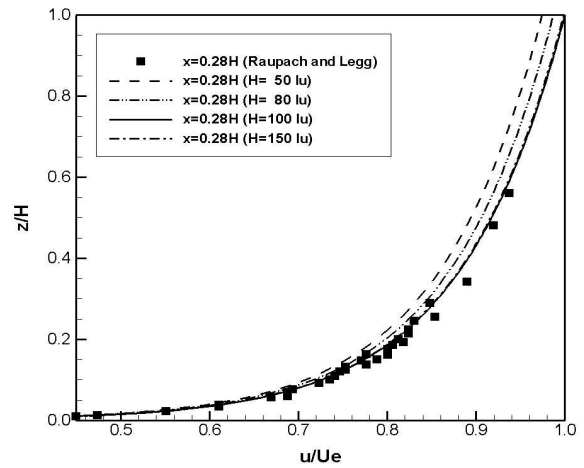


Fig. 4 Mean velocity profiles over the flat floor

우 평균 유동 속도의 변화가 Raupach and Legg의 실험값과 오차가 2% 미만이었다. 계산영역에서의 격자수는 2000×500 ($N_x \times N_y$)으로 총 1,000,000개의 lattice를 사용하였다. 그리고 계산시간은 정상상태(steady-state)를 유지하기 위하여 총 200,000번 반복 계산하였으며, 100,000부터는 각 변수의 평균값을 얻기 위하여 사용되었다.

4. 결과 및 고찰

먼저, 격자 볼츠만 아격자(LB-SGS) 모델이 난류 경계층을 정확하게 모사하고 있는지 검증하기 위하여, 평판에서 떨어진 분출원(ES1)에서 오염물질이 분출될 때의 수직 평균속도 분포와 Raupach and Legg⁽²⁾의 실험값을 Fig. 4에 비교하여 나타내었다. x축은 경계층 내부의 속도(u)를 경계층 높이(H)에서의 평균속도(U_e)로 무차원화한 속도이며, y축은 경계층 높이(H)에 대한 수직 지점의 위치이며, 오염 분출원(ES1)으로부터 0.28배 되는 지점에서의 수직방향의 평균 속도분포는 Raupach and Legg 실험값과 대체로 잘 일치하고 있다. 이것을 통해 LB-SGS 모델이 난류 경계층 내의 유동을 잘 모사하고 있다고 할 수 있다.

Fig. 5는 평판 상에서 평균농도의 수직분포를 나타낸 것이다. 각 기호들은 Raupach and Legg의 실험값으로서, 오염물질이 분출되는 지점(ES1)으로부터 분출원 높이(Hs)의 2.5배, 30배 되는 지점에서의 수직 농도 분포를 나타내고 있다. 실선(solid line)과 점선(dash line)은 본 연구에 의한 결

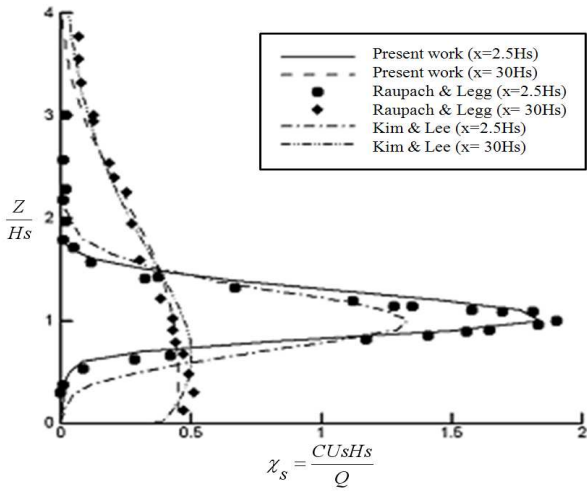


Fig. 5 Mean concentration profiles from an elevated point source(ES1) on a flat floor

과이고, 일점쇄선(dash-dot line)과 이점쇄선(dash-dot-dot line)은 Kim and Lee⁽²⁰⁾가 수행한 RANS 계열 중 하나인 표준 k-ε 모델에 의한 수치계산 결과이다. 결과에서 보듯이 오염 분출원으로 부터 먼 지점(x=30Hs)에서는 본 연구의 결과와 Kim and Lee의 결과는 실험값과 대체로 유사한 농도 분포를 보이고 있다. 그러나 Kim and Lee의 결과에서는 농도가 급격하게 변화하는 오염 분출원 근처(x=2.5Hs)에서의 임계값은 실험결과와 큰 오차를 보이고 있다. 이러한 오차의 원인을 기존의 연구자들은 구배확산이론(K-theory)의 한계⁽²⁾라고 지적하고 있다. 구배확산이론은 열과 오염물질 확산예측에 사용되는 오일러리안(Eulerian)⁽²¹⁾ 확산 모델중 가장 널리 사용되고 있으며, 난류유동에서의 확산은 농도구배 방향으로 물질전달이 일어나고 전달물은 평균 농도구배에 비례한다고 가정하기 때문에 농도 플럭스(flux, \overline{wc})가 전 영역에서 유사한 분포를 가지게 된다. 그러나 ES의 경우와 같이 오염 분출원 근처에서는 급격하게 농도변화가 발생하기 때문에 농도확산의 유사성을 잃게 되어 오염 분출원 근처에서는 상당한 오차가 발생하게 된다. 특히, 기존 연구결과에서는 오염 배출원 근처에서 대류에 의한 확산특성을 제대로 모사하지 못하여 수직방향으로의 확산이 과대예측 됨에 따라 평균농도 최대값이 실험값에 비하여 작게 예측되었을 뿐 아니라 수직방향으로의 확산이 많이 이루어진 분포를 보인다. 즉, RANS 모델들은 구배 확산이론의 한계로 인하여

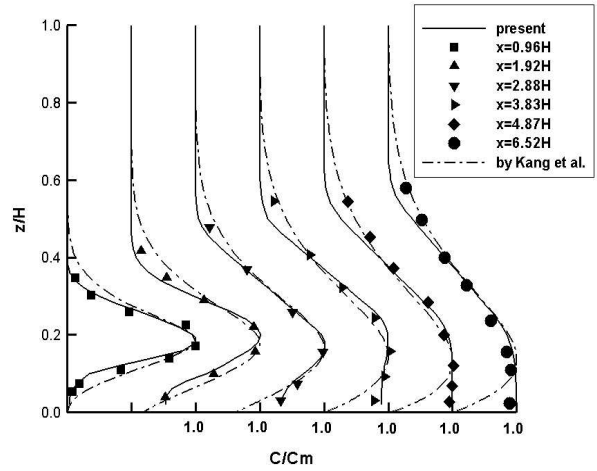


Fig. 6 Mean concentration profiles from an elevated point source(ES2) on a flat floor. [symbols, experiments of Fackrell and Robins]

실제의 농도확산보다 작은 확산을 예측하기 때문에 농도가 급격히 변하는 오염 분출원(ES) 근처에서의 임계점 및 전체적인 확산량을 정확히 예측할 수 없게 된다. Kim and Lee의 수치해석 결과와 비슷하게 구배확산 방정식의 이론해⁽²²⁾에 의한 예측값도 x=2.5Hs에서 $\chi_s = 1.2$ 로, 이러한 오염 배출원 근처에서의 평균농도 임계값의 과소예측 경향은 구배확산이론의 오차에 의한 것임을 재확인할 수 있다. 반면에 본 연구를 통하여 사용된 격자볼츠만 아격자(LB-SGS) 모델은 RANS 모델들보다 정확한 난류량을 예측할 수 있다고 알려진 큰 에디모사(LES) 방법을 적용한 모델이기 때문에 ES의 경우와 같이 농도변화가 급격하게 변화하는 경우에도 오염 분출원 근처의 결과값, 특히 임계점을 정확하게 예측한다.

Fig. 6는 오염 분출원이 바닥으로부터 수직으로 0.19H 만큼 떨어진(ES2) 경우의 농도분포를 보여주고 있다. 각 기호들(symbols)은 Fackrell and Robins⁽¹⁾의 실험값으로서 오염 분출원으로부터 0.96H, 1.92H, 2.88H, 3.83H, 4.79H, 6.52H 지점에서의 수직 평균농도 분포를 각각 나타내고 있다. 실선(solid line)은 본 연구 결과이고 일점쇄선(dash-dot line)으로 표시된 것이 수정된 k-ω 모델을 적용한 Kang 등⁽⁷⁾의 결과이다. 결과에서 보듯이 Kang 등에 의해서 계산된 결과는 실험값과 대체로 잘 일치하고 있으나, 바닥면 근처에서 오차를 보이고 있다. Kang 등은 앞서 본 바 같이 기존 구배확산이론(K-theory)의 단점인 오염 분출

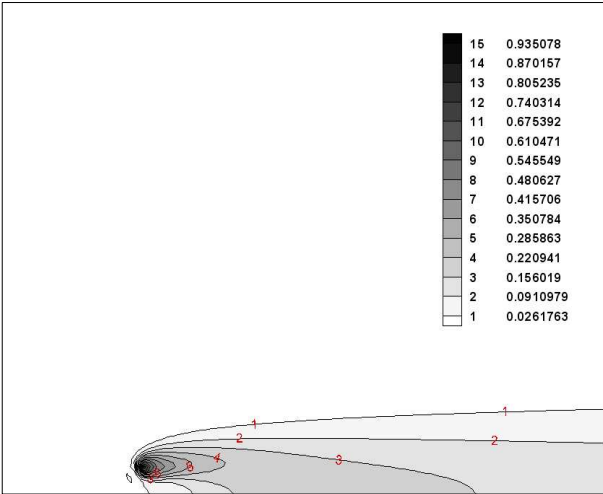


Fig. 7 Concentration contour from an elevated point source(ES2) on a flat floor

원 근처의 농도 변화를 보다 더 정확하게 예측하기 위하여 기존의 표준 k- ω 모델에 농도 변화에 따라 난류 점성계수를 변화시킴으로서 기존의 구배확산이론을 보완한 결과 값임에도 불구하고 바닥면 근처에서의 오차는 줄이지 못하고 있다. 기존의 연구에서도 바닥면 근처에서는 이러한 오차를 내포하고 있는데, 그 원인으로 일반적인 수치 해석에서는 격자간격을 줄임으로서 해석결과의 정확도를 향상시킬 수 있는 반면에 확산문제에서는 격자간격의 가로세로비에 따라 농도해석의 정확도가 좌우된다.⁽²³⁾ 그에 비하여 본 연구를 통한 결과값은 바닥면 근처에서의 농도확산을 잘 예측하고 있는 것을 볼 수 있다. LB-SGS 모델은 기존의 RANS 모델들에 비해 정확한 난류량을 예측할 수 있으며, 기존 연구와는 다르게 격자간격이 등간격이므로 격자선정에 따른 오차가 존재하지 않는다. 이러한 LES와 LBM의 장점이 결합되어진 LB-SGS 모델을 사용함에 따라 기존의 RANS 모델이 가지고 있던 오차 요인들을 줄임으로서 Fig. 6와 같은 정확한 결과를 예측할 수 있는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 오염 분출원이 바닥으로부터 수직으로 0.19H 떨어진 지점(ES2)에서 분출되는 경우의 농도장을 보여주고 있다. Fig. 7에서 보이는 것처럼 오염 분출원 근처에서는 급격한 농도변화를 볼 수 있으며, 난류 경계층 내에서는 대류의 영향으로 수직보다는 수평방향으로 농도확산이 이루어지고 있다.

Fig. 8은 오염물질이 평판의 지표면(GLS)에서

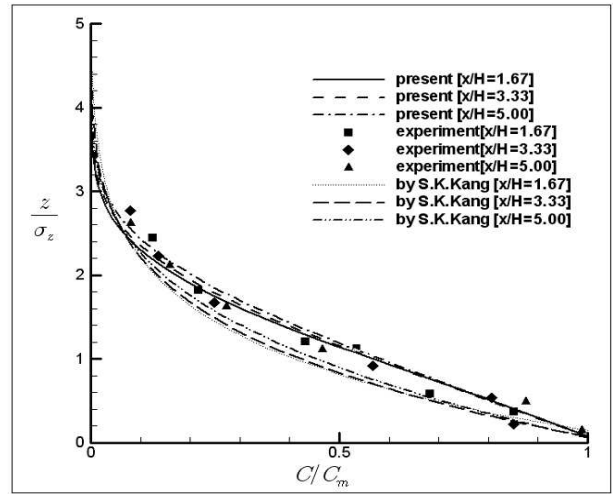


Fig. 8 Mean concentration profiles from a ground-level source(GLS) on a flat floor. [symbols, experiments of Fackrell and Robins]

분출되는 경우, 농도에 대한 수직분포를 나타낸다. 오염 분출원(GLS)으로부터 경계층 높이(H)의 1.67배, 3.33배, 5.0배 되는 지점에서의 농도에 대한 수직분포를 Fackrell and Robins⁽¹⁾의 실험값과 난류 점성계수를 수정된 k- ω 모델을 사용한 Kang 등⁽⁷⁾의 해석 결과와 비교하였다. 이 경우 각각의 무차원화 된 농도의 수직 분포가 오염 분출원으로부터의 거리와는 무관하게 거의 비슷한 농도 분포를 보이고 있다. GLS의 경우 지속적으로 지표면에서 오염물질이 분출되므로, 농도 확산이 지속적으로 유지되어지기 때문에 수정된 k- ω 모델을 사용한 Kang 등⁽⁷⁾에 의해 계산되어진 결과 값도 비교적 정확한 값을 보이지만, 실제 확산양에 비하여 적은 확산양을 산출하였다. GLS의 경우도 앞서 설명한 구배확산이론의 한계에 의한 오차라고 사료된다. 반면에 본 연구에서의 LB-SGS 모델을 사용한 결과는 격자볼츠만 방법의 장점인 입자의 거동을 그대로 모사하는 방식을 사용하기 때문에 보다 적은 오차로 실험값을 보다 정확하게 예측하는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 대기 중의 오염물질의 확산 및 이동되는 현상을 수치적으로 계산하였다. 난류 경계층의 유동을 모사하기 위하여 기존의 NS-LES 방법보다 난류구조를 정확하게 구현하는 LB-SGS 모델을 사용하여 기존의 연구와 비교하였다. 기존의 연구에서는 오염 분출원 근처에서의

농도분포를 정확하게 예측하지 못하여 임계점을 27%정도 과소 예측하는 경향과 바닥면 근처에서 오차가 발생하였다. 이것은 구배확산이론의 한계라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 기존 방법의 한계를 보완하기 위하여 RANS 모델보다 난류 유동장을 정확히 예측하는 LES와 입자의 거동을 직접 모사하는 격자 볼츠만 방법을 통해 기존의 연구보다 보다 더 정확하고 신뢰성 높은 결과를 볼 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 모델은 난류 경계층 내에서의 오염물질의 농도분포를 예측하는데 적합한 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2010년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Fackrell, J.E. and Robins, A.G., 1982, "Concentration Fluctuations and Fluxes in Plumes From Point Sources in a Turbulent Boundary Layer," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 117, pp. 1~26.
- (2) Raupach, M.R. and Legg, B.J., 1983, "Turbulent Dispersion from an Elevated Line Source: Measurements of Wind-Concentration Moments and Budgets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 136, pp. 111~137.
- (3) Bringfelt, B., 1984, "Phoenics - Simulations of Plume Spread in the Lee of a Building and Comparisons with Smoke Experiments and Gaussian Dispersion Formulae," *Meteorologiska Avdelningen for skningssektionen*.
- (4) Serag-Eldin, M.A., 1985, "Spread of Pollutants Emitted from Long and Large Obstacles in Atmosphere," Technical Report 009, Cairo Scientific Center, IBM, Cairo, Egypt.
- (5) Kim, H.G., 1997, "Numerical Investigation of the Pollutant Dispersion over Complex Terrain," *Pohang University of Science and Technology*, Ph.D. Thesis.
- (6) Park, K. and Park, W.K., 1998, "Numerical Solutions of the Fluid Field and Pollutant Dispersion over 2-D Bell-Shaped Hills," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 63~72.
- (7) Kang, S.K., Yoon, J.Y. and Lee D.H., 2002, "A Numerical Analysis for Two-phase Turbulent Flow in the Neutral Atmosphere," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 6, pp. 772~778.
- (8) Wilcox, D.C., 2006, *Turbulence Modeling for CFD - 3rd ed.*, DCW Industries, CA.
- (9) Yu, H., Girimaji, S.S, and Luo, L.S., 2005, "DNS and LES of Decaying Isotropic Turbulence with and Without Frame Rotation Using Lattice Boltzmann Method," *Journal of Computational Physics*, Vol. 209, pp. 599~616.
- (10) Yu, H., and Girimaji, S.S, 2005, "Near-field Turbulent Simulations of Rectangular Jets using Lattice Boltzmann Method," *Physica of Fluids*, Vol. 17, 125106.
- (11) Yu, H., Girimaji, S.S, and Luo, L.S., 2005, "Lattice Boltzmann Simulations of Decaying Homogeneous Isotropic Turbulence," *Physical Review E*, Vol. 71, 016708.
- (12) Chen, S. and Doolen, G.D., 1998, "Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 329~364.
- (13) Shin, M.S., Byun, S.J., and Yoon, J.Y., 2010, "Numerical Investigation of Effect of Surface Roughness in a Microchannel," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 34, No. 5, pp. 539~546.
- (14) Aidun, C.K. and Clausen, J.R., 2010, "Lattice-Boltzmann Method for Complex Flows," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 42, pp. 439~472.
- (15) Bhatnagar, P.L, Gross, E.P. and Krook, M., 1954, "A Model For Collision Processes In Gases. I : Small Amplitude Processes In Charged And Neutral One-Component System," *Physical Review*, Vol. 94, No. 5, pp. 511~525.
- (16) Hou, S., Sterling, J., Chen, C. and Doolen, G.D., 1996, "A Lattice Boltzmann Subgrid Model for High Reynolds Number Flow," *Fields Institute Communications*, Vol. 6, pp. 151~166.
- (17) Smagorinsky, J., 1963, "General Circulation Experiments With The Primitive Equations : I.

- the Basic Experiment," *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99~164.
- (18) Succi, S., 2001, *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*, Clarendon Press-Oxford, New York, pp. 77~96.
- (19) Kays, W., Crawford, M. and Weigand, B., 2005, *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York, pp. 233~239.
- (20) Kim, H.G and Lee, C.M., 1998, "Pollutant Dispersion over Two-Dimensional Hilly Terrain," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 96~111.
- (21) Shim, S.G, 1995, "Eulerian Models," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 11, No. 1, pp. 29~36.
- (22) Kim, H.G and Lee, C.M, 1998, "An Improvement of the Eulerian Dispersion Model by Modifying the Turbulent Diffusivity," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 10, pp. 1483~1489.
- (23) Kasibhatla, P.S., Peters, L.K. and Graeme, F., 1988, "Numerical Simulation of Transport from an Infinite Line Source : Error Analysis," *Atmospheric Environment*, Vol. 22, Issue 1, pp. 75~82.