

다양한 대기풍속 및 대기온도 구배 조건에서의 공장 배출 가스의 확산 특성에 관한 연구

박 일 석[†]

경북대학교 기계공학부

A Study for Characteristics of Stack Plume Dispersion under Various Atmospheric Wind Speeds and Atmospheric Temperature Gradients

Il Seouk Park[†]

School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegul 702-701, Korea

(Received July 13, 2010; revision received September 7, 2010)

ABSTRACT: The dispersion of plume which is emitted from a chimney is governed by a lot of factors : wind, local terrain, turbulence intensity of atmosphere, and temperature, etc. In this study, we numerically investigate the plume dispersions for various altitudinal temperature gradients and wind speeds. The normal atmosphere has the temperature decrease of 0.6°C/100 m, however, actually the real atmosphere has the various altitudinal temperature profiles according to the meteorological factors. A previous study focused on this atmospheric temperature gradient which induces a large scale vertical flow motion in the atmosphere thus makes a peculiar plume dispersion characteristics. In this paper, the effects of the atmospheric temperature gradient as well as the wind speed are investigated concurrently. The results for the developing processes in the atmosphere and the affluent's concentrations at the ambient and ground level are compared under the various altitudinal temperature gradients and wind speeds.

Key words: Plume dispersion(배출가스 확산), Wind speed(풍속), Ground level concentration(착지 농도), Atmospheric temperature gradient(대기온도구배)

1. 서 론

산업화에 따른 경제 발전은 인류의 생활수준을 지속적으로 높여온 반면, 산업화의 필연적 부산물인 공장 배출가스는 건강한 삶을 갈망하는 인류에게 풀어야할 숙제를 하나 더 만들어 놓았다. 배출가스의 대기 확산 문제는 환경연구가 및 환경단체, 기상학자 등 다양한 분야의 연구자들에 의해 오랫동안

안 관심의 대상이 되어온 분야로서⁽¹⁻¹⁹⁾, 현상학적으로는 대기 유동, 대기 온도, 해양 조류, 산불 등 자연 재해, 지형 및 도시 구조 등 다양한 인자들의 영향을 받는 다중물리현상이라 할 수 있다.

이들 중 대기 유동(바람, atmospheric wind flow)은 오염물질의 대기 확산에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 다시 풍향 및 풍속, 대기의 난류 강도 등의 부인자(sub-parameter)들을 포함하고 있다. 대기 중에서의 오염물질 확산은 대기 자체의 난류 강도에 따라 확산 특성의 확연한 차이를 보일뿐만 아니라 대륙풍, 계절풍, 육지풍, 해풍, 계곡풍, 건물풍 등 시공간적으로 매우 다양한 규모의 유동 양상에

[†] Corresponding author

Tel.: +82-53-950-6573; fax: +82-53-950-6550

E-mail address: einstein@knu.ac.kr

의해 지배받기 때문에 많은 환경연구자들이 이에 집중하여 대기 오염 연구를 수행한 바 있다.

대기의 난류강도가 오염물질의 대기 중 미세 확산 특성을 지배하는 반면, 대기의 연직방향 온도구배는 대기의 상승/하강 기류를 만들어 내는 등 대기의 연직방향 유동 안정성을 지배하기 때문에 거시적인 측면에서의 오염물질 확산에 영향을 미친다. 평균적인 대기의 연직방향 온도 구배는 일반적으로 고도 100 m 상승에 따라 온도가 0.6°C 감소하는 것으로 알려져 있다. 하지만 고도 500 m 이하의 대류 영역에서는 하루 중 밤낮에 따라 교차하며 부는 해풍/육지풍/계곡풍 등에 의한 국지적 찬공기의 유입 또는 낮 시간대에 대위된 지열에 의한 지면의 온도 상승, 산불로 인한 복사 열전달에 의한 온도구배 변화 등 다양한 환경적 요인에 의해 다른 연직방향 온도구배를 가질 수 있다.

배출가스의 대기 확산에 관한 이전의 연구는 크게 대기 확산에 관한 수치모형(numerical model) 개발 및 적용, 축소모형을 이용한 상사실험, 전산유체해석을 통한 수치해석의 세 분야로 나눌 수 있다. 우선 수치모형 개발과 관련하여 Briggs^(1,2)는 간단한 기구학적 이론이 적용된 Touch-Down 모델을 이용하여 대기의 상승/하강 기류에서의 오염물질 확산 특성을 분석하였다. Lamb⁽³⁻⁴⁾은 Gaussian Plume Model을 수정하여 배출가스 농도의 연직방향 non-gaussian 분포 특성을 설명하였다. Venkatram⁽⁵⁾은 이전의 다양한 모형을 종합하여 발전소 배출가스에 대한 확산 특성을 비교 분석하였으며, Deardorff⁽⁶⁻⁷⁾는 난류 영향에 의한 배출가스 확산경로에 대하여 연구하였다. Buske et al.⁽⁸⁾과 Tirabassi et al.⁽⁹⁾은 GILTT(Generalized Integral Laplace Transform Technique)를 통해 낮은 풍속에서의 정상상태 대류-확산식의 해에 대한 수학적 모형을 개발하였다.

실험적 연구로는 Carras et al.⁽¹⁰⁾은 열대지방의 plume-looping 현상에 대한 실험적 연구를 수행하여 배출가스의 수직방향 확산에 관한 경험 모형을 제안하였으며 이를 통하여 착지농도(GLC, Ground Level Concentration)를 계산하였다. Fedrovich et al.⁽¹¹⁾은 대기의 난류전단(turbulence shear) 흐름이 배출가스 확산에 미치는 영향에 대하여 최초로 실험적 연구를 수행한 바 있다. Said et al.⁽¹²⁾은 굴뚝 배출가스 흐름과 대기 유동 간의 상호 연관 관계를 PIV (Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 가시화하였으며 굴뚝에 의해 발생하는 wake 유동이 배

출가스 확산에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

수치해석 연구로 Dehghan et al.⁽¹³⁾은 대기 유동에 대해 Low-Reynolds $k-\epsilon$ 난류 모형을 적용하여 배출가스 확산에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 특히 복수로 구성된 굴뚝 배열에 따라 배출가스 착지농도를 비교 분석하였다. Mavroidis et al.⁽¹⁴⁾은 정방향 장애물 후방에서의 배출가스 확산 유동에 관하여 수치해석하고 실험결과와 비교하였다. Hsieh et al.⁽¹⁵⁾은 도시지역에서의 배출가스 확산 유동에 대한 해석을 위해 표준 $k-\epsilon$ 난류 모형을 바탕으로 간략한 난류확산 모형을 개발하고 이를 water-channel 실험으로부터 얻어진 결과와 비교하였다. Boetcher et al.⁽¹⁶⁾은 강제유동이 없는 환경에서 가열된 구(sphere)에 의해 발생하는 부유류(buoyant plume)에 대한 층류 유동 해석을 수행하였으며, Matsushita⁽¹⁷⁾와 Noto et al.⁽¹⁸⁾은 안정적으로 열적 성층화(thermally stratified)가 이뤄진 대기에서 배출가스 난류 확산 특성을 직접 수치 해석법(DNS, Direct Numerical Simulation)으로 해석한 바 있다. Park et al.⁽¹⁹⁾은 대기온도의 수직방향 분포에 따른 배출가스 확산 특성을 수치해석하여 대기의 불안정성으로 인하여 발생하는 상승 및 하강 기류에 의한 배출가스 확산 특성을 분석하였다.

Park et al.⁽¹⁹⁾의 연구는 대기온도의 고도 방향 구배 조건에 따라 발생하는 상승/하강 기류와 이로 인해 발생하는 배출가스의 연직방향 운동이 배출가스 확산에 매우 큰 영향을 미침을 수치해석적으로 보임으로써 배출가스 확산 관련 연구의 범위와 방향을 한층 확대했다고 평가할 수 있다. 이에 본 연구에서는 대기온도의 고도 방향 구배에 추가로 대기 풍속의 영향을 추가하여 풍속과 대기 온도 구배에 따른 대기 중 배출가스 확산 특성을 상호 비교, 분석하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 경계조건

본 연구의 해석 영역을 Fig. 1에 나타내고 있다. 굴뚝의 직경(d)은 1 m, 높이(h) 30 m, 대기 유동 입구에서 굴뚝까지의 거리(L_0) 100 m, 전체 계산 영역 길이(L) 1000 m, 높이(H) 600 m, 폭(W) 300 m이다.

해석을 위해 3차원, 비정상, 비압축성, 난류, 혼합 대류에 대하여 다음의 질량, 운동량, 에너지, 농도에

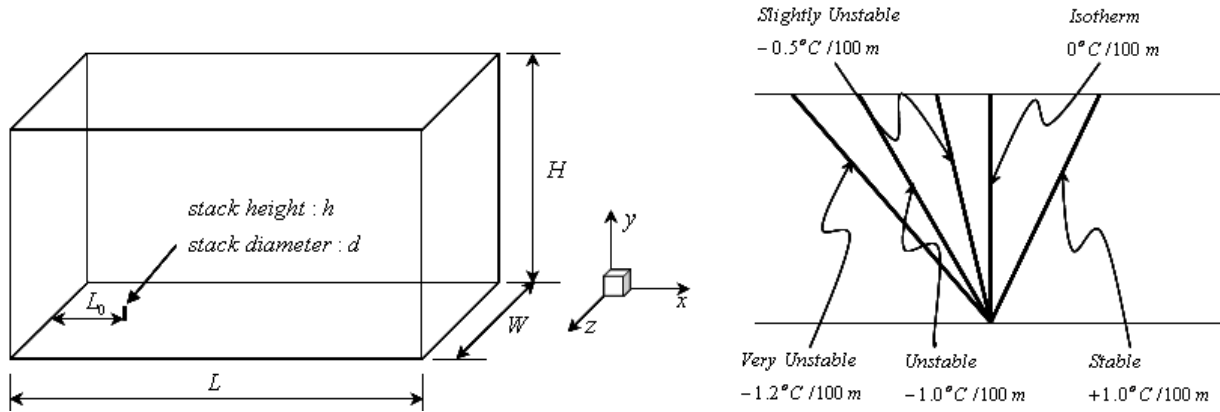


Fig. 1 Computational domain and various ambient temperature gradient.

대한 보존식(식(1)~식(4))을 지배방정식으로 사용하였으며, 난류 유동해석을 위해 표준 k-ε 모델을 채택하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho g \delta_{2i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{eff} \frac{\partial \rho C}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

u는 속도, ρ 밀도, x 좌표성분, g 중력가속도, P 압력, C_p 정압비열, T 온도, k 열전도도, t 시간, δ Kronecker delta 함수, τ_{ij} 응력텐서, 하첨자 eff는 난류확산 효과가 포함된 유효치를 나타내고 있다. C는 공기에 대한 NO(nitrogen-oxide)의 질량비에 의한 농도를 나타내며, D는 NO의 공기에 대한 물질확산계수를 의미한다. 해석에 사용된 모든 물성값들은 NO와 공기의 질량분율에 따라 평균값으로 적용하였다. 실제 배출가스는 공기와 NO, CO, CO₂, SO₂, NO₂ 등의 혼합물이지만 본 연구에서는 단순히, 공기와 NO의 혼합물로 가정한다.

자연대류해석을 위하여 일반적으로 단일종의 온도차가 작은 경우에 사용되는 Boussinesq 근사법 대신 본 연구에서는 다음의 식(5)와 같이 비압축성 이상기체식을 사용하였다.

$$\rho = P_{op} / ((R/M)T) \quad (5)$$

여기서, P_{op}는 대기압으로 일정한 값이며, R은 기체상수, M은 공기-NO 혼합물의 분자량, T는 온도이다.

지배방정식 해석을 위한 경계조건은 다음과 같다. 속도에 관한 경계조건은 모든 벽에서 점착조건을 사용하였으며, 대기유동 입구에서는 일정 속도 조건을 사용하였는데 풍속은 1~5 m/s를 적용하였다. 측면 경계 및 대칭면에서는 모든 속도 성분의 수직방향구배(normal gradient)가 없도록 하였다. 출구 영역에서는 출구방향 1차 미분이 영이 되도록 하였다. 온도에 관한 경계조건으로는 출구 및 대칭면에서는 속도 경계조건과 마찬가지로 출구방향 1차 미분이 영이 되도록 하였으며, 바닥면의 온도는 20°C로 일정, 입구면 및 윗면과 측면 경계의 온도는 대기온도구배에 따라 다음의 식(6)을 사용하였다.

$$T[K] = \alpha \cdot \frac{y[m]}{100} + 297.15 \quad (6)$$

여기서, α는 온도구배 지수로 Fig. 1에 표시한 바와 같이 경우에 따라 -1.0에서 1.0의 값을 적용한다.

농도에 대하여는 입구에서는 영, 바닥면 및 출구, 측면, 대칭면 경계에서는 경계면에 수직한 방향의 1차 미분이 영이 되도록 하였다. 배출가스의 배출 속도는 15 m/s, 배출온도 295°C, 배출농도 0.0011이다.

지배방정식 식(1)~식(4)는 유한체적법에 근간을 둔 상용 소프트웨어인 Fluent를 이용하여 해석하였다. 총 격자수는 128,000개를 사용하였으며, 비정상상태 해석을 위한 시간증분은 1초로 설정하였다. 격자계 의존도 및 시간증분 의존도 검사는 Park et al.⁽¹⁹⁾의 참고문헌을 참고하기 바라며, 본 연구에 사용된 격자수와 시간증분이 유일해를 얻기 위해 충분함을 확

인할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

대기 풍속의 영향에 대한 토의를 하기 전에 우선 대기의 연직방향 온도구배에 따른 대기 확산 특성을 알아보기 위해 Fig. 2와 같이 대기 풍속은 2.5 m/s로 일정하고 온도구배 지수, α 가 -1.0, -0.5, 0.0, 1.0인 경우들에 대한 대기 중 배출가스의 확산 거동을 비교하였다. α 가 1.0인 경우는 고도 100 m 상승 시 대기온도가 1°C 상승하는 경우로 산불 등에 의한 복사 열전달로 상층 대기가 데워지거나 데워진 더운 공기가 상층 대기로 유입된 경우에 발생하며 매우 안정적인 대기 상태이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 배출가스는 대기 중으로 높이 상승하지 못하고 적당한 고도 안에서 갇히게 되며 따라서 매우 큰 착지농도가 나타난다. α 가 0.0인 경우는 고도 상승에 따른 대기 온도 변화가 없는 상태이다. 이 경우는 굴뚝으로부터 고온 상태로 배출된 가스가 $\alpha = 1.0$ 인 대기에 비해 더 낮은 온도의 대기와 만나므로 주위 공기와의 상대적인 부유력에 의해 대기 중에서 상승하고 있음을 확인할 수 있다. α 가 -0.5인 경우는 고도 100 m 상승 시 대기온도가 0.5°C 강하하는 경우로 일반적인 대기 상태이다. 상층 대기의 온도가 낮아 대기가 약간 불안정한 상태이며 배출가스가 활발하게 부유하고 있다. α 가 -1.0인 경우

는 고도 100 m 상승 시 대기온도가 1.0°C 강하하는 경우이며 낮 시간 동안 데워진 지표면에 의해 하층 대기의 온도가 높고 상층대기로 찬 공기가 유입되는 야간에 자주 나타나는 경우이다. 대기 상태가 매우 불안정하며 이로 인하여 배출가스가 상하로 크게 흔들리는 모습을 확인할 수 있다.

Fig. 3에서는 온도구배 지수가 0.0인 경우에 풍속을 1.0 m/s에서 2.5 m/s까지 변화시킨 경우의 배출가스 확산 특성을 비교하여 나타내었다. 이 경우들은 대기 온도가 고도에 따라 균일한 상태로 대기 자체의 불안정성으로 인한 상하유동이 유발되지는 않는 경우이다. 풍속이 빨라짐에 따라 배출가스의 상승 운동량이 대기 유동에 의해 억제되고 있는 모습을 볼 수 있고 이로 인하여 큰 착지 농도가 나타날 것으로 예상된다. 풍속이 작아짐에 따라 배출가스 상승흐름에 의해 상층대기까지 배출가스가 도달하고 대기 중의 확산량이 커짐을 확인할 수 있다. 배출가스 확산은 배출가스 주흐름의 후류 아랫방향에서 주로 나타나며 이는 대기 유동이 배출가스 주흐름을 분산(scattering) 및 확산(dispersion)시킨 결과이다.

Fig. 4에서는 온도구배 지수가 -1.0인 경우에 풍속을 2.5 m/s에서 4.0 m/s까지 변화시킬 경우의 배출가스 확산 특성을 비교하여 나타내었다. 온도구배 지수가 -1.0인 경우는 온도 역전현상으로 대기 자체가 불안정한 상태이다. 그림에서 볼 수 있듯이

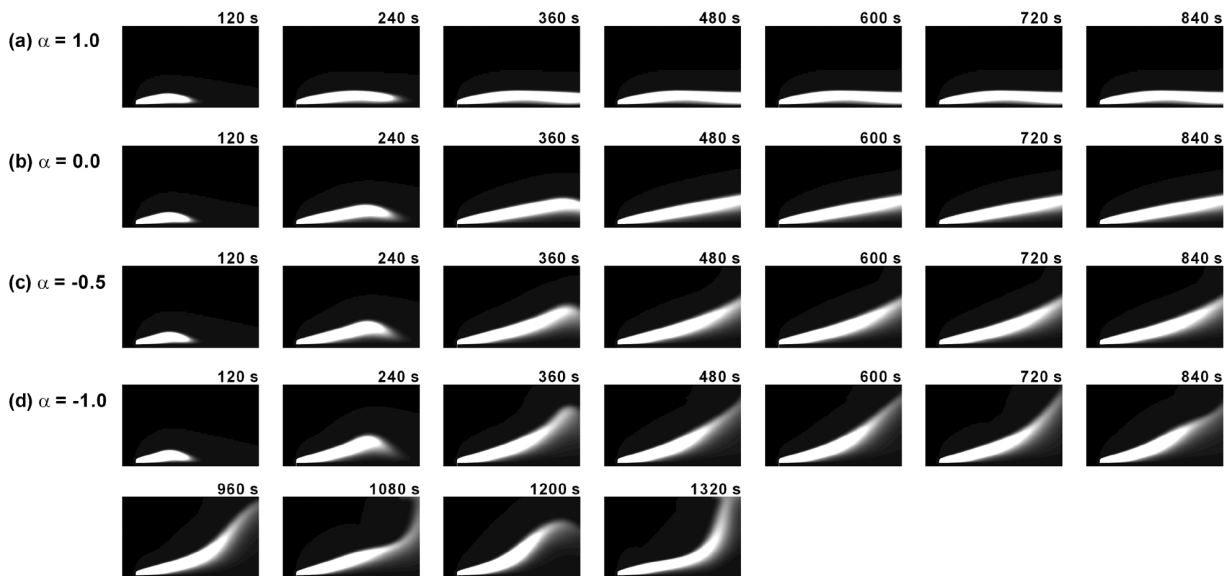


Fig. 2 Developing progresses of concentration fields on the symmetry plane at $V_{in} = 2.5$ m/s, (a) $\alpha = 1.0$, (b) $\alpha = 0.0$, (c) $\alpha = -0.5$, and (d) $\alpha = -1.0$.

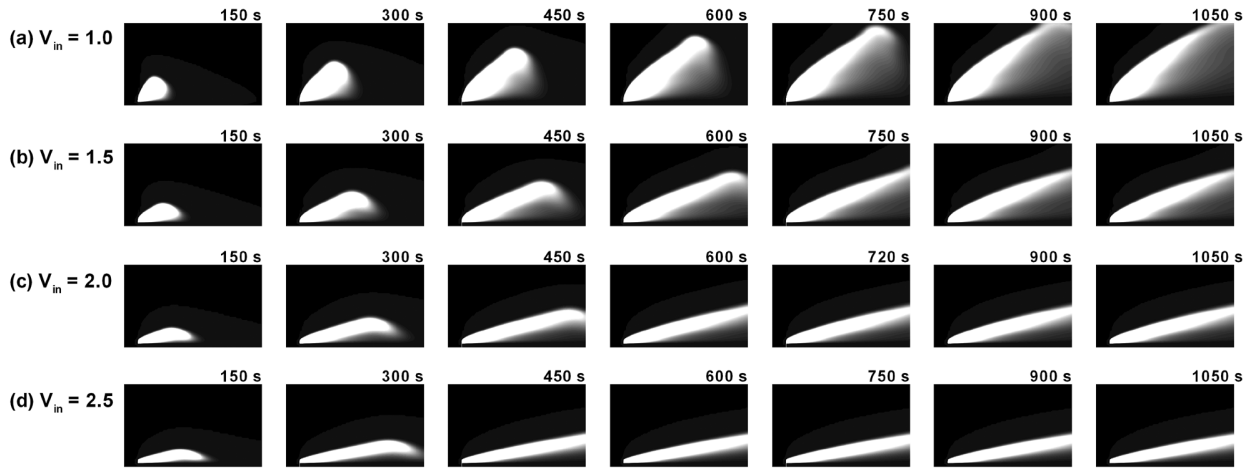


Fig. 3 Developing progresses of concentration fields on the symmetry plane at $\alpha = 0.0$, (a) $V_{in} = 1.0$ m/s, (b) $V_{in} = 1.5$ m/s, (c) $V_{in} = 2.0$ m/s, and (d) $V_{in} = 2.5$ m/s.

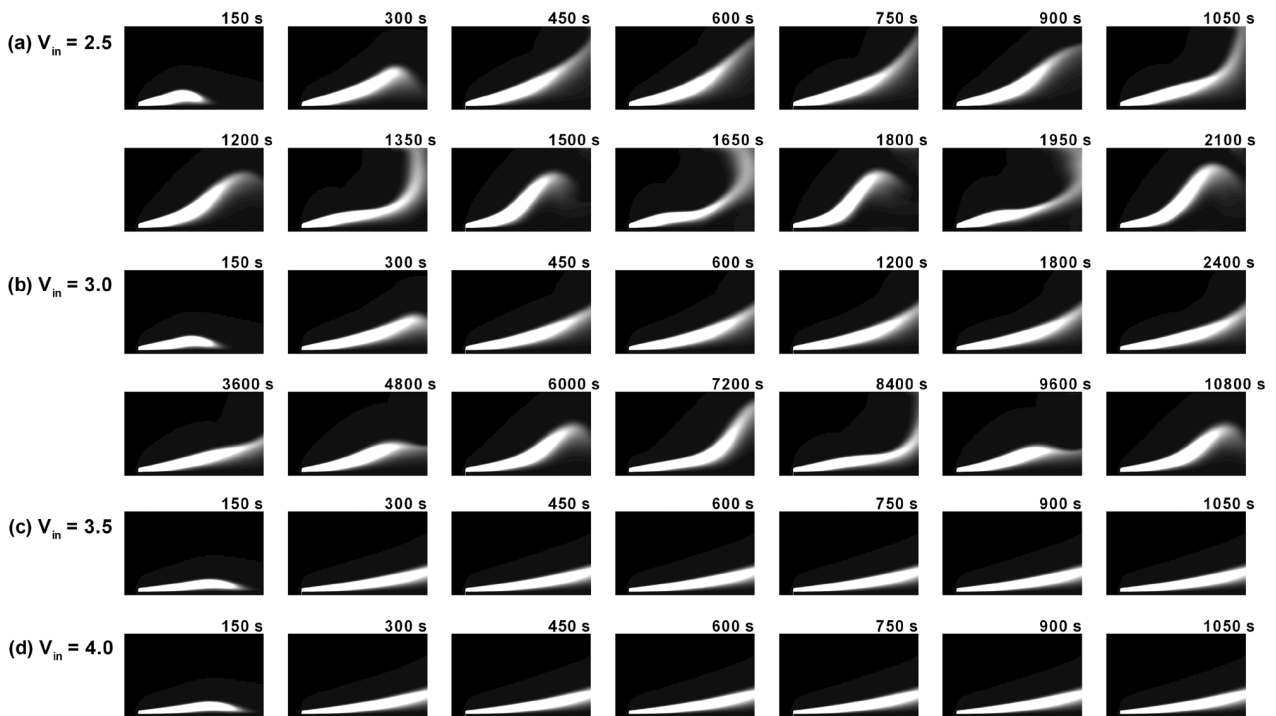


Fig. 4 Developing progresses of concentration fields on the symmetry plane at $\alpha = -1.0$, (a) $V_{in} = 2.5$ m/s, (b) $V_{in} = 3.0$ m/s, (c) $V_{in} = 3.5$ m/s, and (d) $V_{in} = 4.0$ m/s.

풍속이 3 m/s 이하에서는 배출가스가 매우 불안정한 확산 거동을 보이고 있다. 하지만 풍속이 3.5 m/s 이상에서는 대기 유동에 의해 배출가스의 불안정한 확산 현상이 억제되고 있으며 온도구배 지수가 0.0인 경우와 비슷한 확산 특성을 나타내고 있다. 배출가스의 불안정한 확산 거동을 보이는 풍속 2.5 및 3.0 m/s 중에서도 풍속이 2.5 m/s로 작은 경우의 배출가스의 상하 요동 주기가 더 짧은 것을

확인할 수 있다.

Fig. 5는 온도구배 지수가 0.0인 경우에 다양한 풍속 조건에서 골짜기 하류에서의 배출가스 착지 농도를 비교하였다. 착지농도는 대기 환경문제와 별도로 주거환경에 직접적으로 관련된 지표로서 최근에는 아파트 등의 주거단지를 조성함에 있어 인근 유해가스 배출원의 영향을 사전에 검토하기도 한다. 기존의 주거환경 검토에서는 풍향, 풍속, 건물배

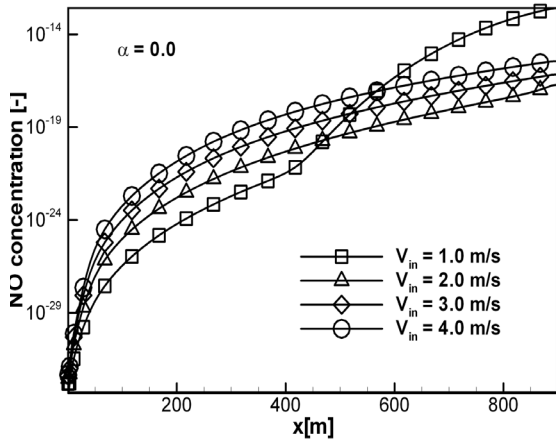


Fig. 5 Ground level concentration for various wind speeds at $\alpha = 0.0$.

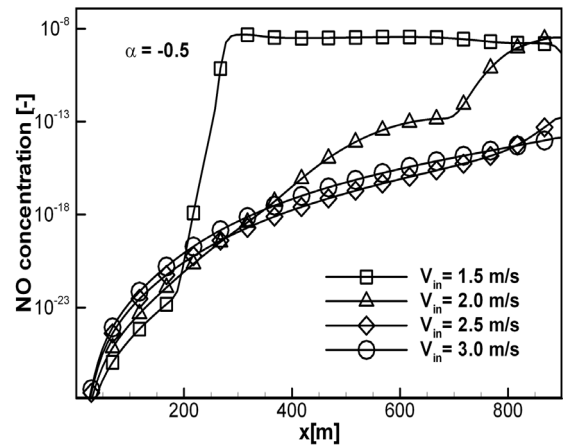


Fig. 6 Ground level concentration for various wind speeds at $\alpha = -0.5$.

치 및 지형 특성 등만을 고려한 해석이 주를 이루었지만 본 연구에서는 이와 함께 대기의 안정 조건을 같이 고려함으로써 보다 실제적인 현상을 묘사하고 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 풍속이 빨라짐에 따라 배출가스의 상승이 억제되어 착지농도가 더 높게 나타나고 있다. 특이한 점은 풍속이 1 m/s 인 경우에 굴뚝 후방 400 m 지점부터 착지농도가 급격히 증가하는 현상이 나타나고 있다. 이는 Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 대기 유동이 배출가스 주흐름을 분산시키기 때문으로 배출가스가 상승함에 따라 주위 공기와의 상대적인 온도차로 불안정한 확산 특성이 나타나기 시작하는 단계로 여겨진다. 대기 온도구배가 영인 조건이라도 풍속이 작아짐에 따라 배출가스가 불안정한 확산 거동을 보일 수 있으며 이와 유사한 패턴이 Fig. 6의 풍속 1.5 m/s 조건과 Fig. 7의 풍속 2.5 및 3.0 m/s의 조건에서 확인할 수 있다. 온도구배 지수가 -0.5 및 -1.0으로 대기 자체가 불안정한 구조를 가진 상황에서 풍속에 따른 착지농도를 비교하면 먼저 온도구배지수가 -0.5인 경우에는 풍속이 1.5 m/s인 경우 굴뚝 후방 200 m 근방에서 급격한 착지농도 증가 현상이 나타나고 2.0 m/s 인 조건에서는 굴뚝 후방 약 700 m 지점에서 착지농도 증가 현상이 나타나고 있다. 온도구배지수가 -1.0 인 Fig. 7의 경우에는 풍속 3.0 m/s 조건에서 이미 배출가스 확산이 불안정해져 굴뚝 후방 약 500 m 지점에서 착지농도 증가 현상이 나타나고 있다. 3.0 m/s의 풍속은 온도구배지수 -0.5인 경우에는 현재 고려되고 있는 계산 영역 내에서는 착지농도 증가 현상이 나타나지 않았다. 배출가스 요동으로 인하여 실제 착지 농도 분포는 시간에 따라 달라지며 Fig.

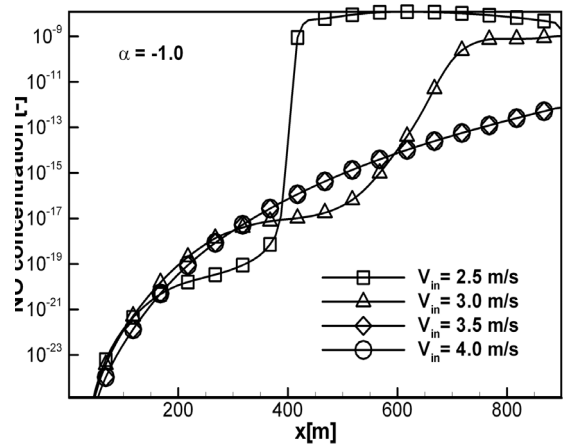


Fig. 7 Ground level concentration for various wind speeds at $\alpha = -1.0$.

5~Fig. 7은 배출 시작 후 10,000초 경과시간에서의 순간 값을 나타내었다.

4. 결 론

고도에 따른 대기온도구배를 고려한 배출가스 확산 특성을 관찰함으로써 대기의 안정 상태에 따라 달라지는 배출가스 확산 특성을 수치적으로 예측하였다. 이를 통하여 유해 배출가스에 대한 주거 환경을 평가하는데 있어 기존의 바람 및 지형, 건물 배치 등에 국한하여 평가되었던 배출가스 주거환경 평가에 대기의 안정성의 영향을 추가하여 예측할 수 있게 됨으로써 보다 현실적이고 엄밀한 평가를 할 수 있게 되었다. 또한 같은 대기 온도구배 조건이라도 풍속에 따라 배출가스 확산 거동이 안정적

이거나 불안정해져 온도구배지수가 0.0인 경우에는 1 m/s 풍속에서 굴뚝 후방 400 m 지점에서 착지농도 증가현상이 나타나는 반면 그 이상의 풍속에는 배출가스가 대기 중에 안정적으로 확산됨을 확인할 수 있었다. 또한 온도구배지수가 -0.5 및 -1.0인 경우에는 각각 2.0 m/s 및 3.0 m/s로 큰 풍속 조건에서도 굴뚝 후방에서의 착지농도 증가현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2010학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Briggs, G. A., 1975, Plume rise predictions, In Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses, American Meteorology Society, Boston, pp. 10-51.
- Briggs, G. A., 1983, Plume Rise and Buoyancy Effects, In Atmosphere Science and Power Production D. Randerson, Tech. Inform. Center, U.S. Dept. of Energy, Oak Ridge, TN, pp. 22-30.
- Lamb, R. G., 1978, A Numerical Simulation of Dispersion from an Elevated Point Source in the Convective Planetary Boundary Layer, Atmospheric Environment, Vol. 12, pp. 1297-1304.
- Lamb, R. G., 1979, The Effects of Release Height on Material Dispersion in the Convective Planetary Boundary Layer, In Forth Symposium on Turbulence, Diffusion and Air Pollution AMS, Reno, Nevada, pp. 27-33.
- Venkatram, A., 1980, The Relationship between the Convective Boundary Layer and Dispersion from Tall Stacks, Atmosphere Environment, Vol. 14, pp. 763-767.
- Willis, G. E. and Deardorff, J. W., 1983, On Plume Rise within a Convective Boundary Layer, Atmospheric Environment, Vol. 17, No. 2, pp. 2435-2447.
- Willis, G. E. and Deardorff, J. W., 1974, A Laboratory Model of the Unstable Planetary Boundary Layer, J. Atmos. Sci., Vol. 31, pp. 1297-1307.
- Buske, D., Vilhena, M. T., Moreira, D. M. and Tirabassi, T., 2007, Simulation of Pollutant Dispersion for Low Wind Conditions in Stable and Convective Planetary Boundary Layer, Atmospheric Environment, Vol. 41, pp. 5496-5501.
- Tirabassi, T., Tiesi, A., Buske, D., Vilhena, M. T. and Moreira, D. M., 2009, Some Characteristics of a Plume from a Point Source Based on Analytical Solution of the Two-Dimensional Advection-Diffusion Equation, Atmospheric Environment, Vol. 43, pp. 2221-2227.
- Carras, J. N. and Williams, D. J., 1984, Experimental Studies of Plume Dispersion in Convective Conditions-I, Atmospheric Environment, Vol. 18, No. 1, pp. 135-144.
- Fedrovich, E. and Thater, J., 2002, A Wind Tunnel Study of Gaseous Tracer Dispersion in the Convective Boundary Layer Capped by a Temperature Inversion, Atmospheric Environment, Vol. 36, pp. 2245-2255.
- Said, N. M., Mhiri, H., Le Palec, G. and Bournot, P., 2005, Experimental and Numerical analysis of Pollutant Dispersion from a Chimney, Atmospheric Environment, Vol. 39, pp. 1727-1738.
- Mokhatarsadeh-Dehghan, M. R., Konig, C. S. and Robins, A. G., 2006, Numerical Study of Single and Two Interacting Turbulent Plumes in Atmospheric Cross Flow, Atmospheric Environment, Vol. 40, pp. 3909-3923.
- Mavroidis, I., Andronopoulos, S., Bartzis, J. G. and Griffiths, R. F., 2007, Atmospheric Dispersion in the Presence of a Three-Dimensional Cubical Obstacle : Modeling of Mean Concentrations and Concentration Fluctuations, Atmospheric Environment, Vol. 41, pp. 2740-2756.
- Hsieh, K. J., Lien, F. S. and Yee, E., 2007, Numerical Modeling of Passive Scalar Dispersion in an Urban Canopy Layer, J. of Wind Eng. and Ind. Aero., Vol. 95, pp. 1611-1646.
- Boetcher, S. K. S. and Sparrow, E. M., 2007,

- Simulation of Laminar Axisymmetric Buoyant Plumes : A Case Study of the Anatomy of Similarity Solutions, Numer Heat Transfer A, Vol. 52, pp. 399-415.
17. Noto, K. and Matsushita, Y., 2007, Formulations and Direct Numerical Simulation Methods for Effects of Coriolis Forces, Latitude, and Stability Stratified Ambient on a Large-Scale Thermal Plume, Numer. Heat Transfer A, Vol. 51, pp. 363-392.
 18. Noto, K. and Nakai, K., 2008, Direct Numerical Simulation of Turbulent Thermal Plume in Stably Stratified Ambient : Formulation, Numerical Methodology, Reverse Transition, Relaminarization, and Turbulent Enhancement, Numer Heat Transfer B, Vol. 53, pp. 313-357.
 19. Wee, S.-K. and Park, I. S., 2009, Plume Dispersion Characteristics in Various Ambient Air Temperature Gradient Conditions, Numer Heat Transfer A, Vol. 56, pp. 807-826.