

화력발전소 배출가스 중 질소산화물의 확산에 관한 연구

박미정 · 조영민 · 성두용¹ · 김미정² · 박영구^{2†}

경희대학교 환경응용과학과, (주)수국¹, 강원대학교 환경공학과^{2†}
(2013년 5월 7일 접수; 2013년 7월 17일 수정; 2013년 7월 18일 채택)

Simulation Study of NO_x Dispersion from Power Plant Stack Gas

Mi-Jeong Park · Young-Min Jo · Doo-Yong Sung · Mi-Jeong Kim² · Young-Koo Park^{2†}

Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University, Korea

¹Sookook Corporation, Korea

^{2†}Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Korea

(Received May 7, 2013 ; Revised July 17, 2013 ; Accepted July 18, 2013)

Abstract : Various efforts have been explored to save the cost in many industrial fields. In order to recover the residual thermal energy from the flue gas, an extreme high efficiency heat exchanger is planning to install at a power plant. The gas temperature will be reduced to 40° C from 115° C. Thus gas buoyancy decreases, and dispersion of nitrogen oxides is expected to deteriorate as increasing relative humidity. In this study, the conversion of nitrogen monoxide to nitrogen dioxide and dispersion regime are investigated through computational modeling. Nitrogen dioxide which indicates 0.1 ppm at 85 m from the ground could be propagated to 620 m at 115° C of the flue gas, whilst when cooled down to 40° C, it expands up to 750 m. The ground level influence area showed more expansion of dispersion, approximately to 930 m.

Keywords : Numerical simulation, Sack, Chemical reaction, Nitrogen dioxide, Acid mist

1. 서론

공장 굴뚝에서 배출되는 배출가스는 전세계적으로 널리 주목하고 있으며, 세계 10대 문제 중 2가지가 환경오염과 에너지 소비이다. 대기오염 물질의 대표적인 질소산화물의 주된 배출원은 화력발전소이다. NO₂는 대류권 오존을 생성하는 주된 요소이며, 인간과 식물에 해를 끼치는 산성

비 생성에 기여를 하기도 한다. 대기 중의 스모그를 생성시키는 광화학 물질인 NO₂의 배출 예방은 중요하다[1]. 세계적인 에너지 문제에 관해서, 우리나라 역시 에너지원의 효과적인 사용과 관리에 대한 관심을 가지고 있으며, 도시의 발전소 굴뚝을 통해 배출되는 가스로부터도 열에너지를 회수하려고 노력하고 있다. 그러나, 극단적인 배기가스의 열회수는 큰 plume과 오염물질의 확산 저해를 유발시킴으로써 지역 대기질을 악화시킬 수 있다. 따라서, 발전소에서 NO₂의 배출과 주변 확산 과정을 추정 할 필요가 있다.

[†]Corresponding author
(E-mail : ygpark@kangwon.ac.kr)

많은 연구자들은[2, 3] NO에서 NO₂ 변화 메커니즘을 조사했다. 오염물질 분산 모델링은 수치 시뮬레이션에 의해 폭넓게 연구되고 있다. Yousif(2006)는 가우시안 모델을 기초로 리비아 발전소에서 발생하는 오염물질의 분산을 조사하였다[4]. 이 연구는 공장의 굴뚝에서 약 1.0 ~ 2.5 km 높이에서 영향을 주는 NO₂ 최악의 배출 조건을 바탕으로 하고 있다. Freddy는 점 오염원에서 높게 방출되는 NO₂와 SO₂를 관찰하였으며, 오염물질의 분산이 지상 최대 농도 NO₂와 SO₂ 각각 5809 μg/m³, 479 μg/m³으로 바람의 방향에 의해 영향을 받았음을 증명하였다[5]. 대부분 NO₂ 분산의 경우 수증기와 배기가스의 온도와의 상호작용을 무시한다. 또한 몇몇의 논문에서 대기로 방출되는 plume을 설명하지 않고 있어 본 연구에서는 이에 대한 고찰을 실시하고자 한다. 따라서 본 연구는 일산 열병합발전소를 대상으로 현재 115 °C로 배출되는 배기가스의 온도를 40 °C까지 낮추는 열 회수 시스템을 실제로 적용하기 전에 인근 지역에 대한 공기질 변화를 수치해석적으로 사전 예측하였다.

2. 실험 및 방법

2.1. 수학적모델

대기로 방출되는 배가스는 질량, 힘, 에너지에 관한 미분 방정식과 난류 모델 방정식에 의해 설명된다. 표준 k - ε 모델은 산업의 흐름과 열 전달 시뮬레이션의 안정성과 경제성, 정확성을 설명하는데 이용된다. Eddy viscosity(2002)는 연속방정식과 Navier-stokes 방정식을 기반으로 하고 있다[6]. 3차원 유체흐름을 나타내는 방정식은 문헌에 잘 설명되어 있다[7].

Solver 프로그램인 SIMPLE은 Patankar와 Spalding(1972)의해 가속도와 연속방정식이 제안되었다. 높은 상풍의 방향은 2차적 정확성을 위해 모든 변수를 사용한다[8]. 반복적으로 프로세스가 지속될 때, 유체 변수의 변화는 under-relaxation 계수 이용에 따라 감소할 수 있다. 변환기준을 10⁻⁵으로 설정하고, 만족 될 경우 계산에 의한 프로세스의 반복은 멈춰진다.

2.2. 질소산화물 거동 모델링

유체이송모델은 대류, 확산 및 반응의 각 요소를 설명하는 방정식으로 유체의 혼합 및 움직이

는 것을 시뮬레이션 할 수 있으며, 다음의 수식으로부터 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

ρ : the density of mixture

Y_i : the local mass fraction of each species

J_i : mass flux of fluid

R_i : the net rate of production of species i by chemical reaction

S_i : the rate of creation by addition from the dispersed phase.

유체이송모델의 정량적 반응은 finite-rate/eddy-dissipation에 의한 질소산화물의 확산과정을 중심으로 이루어진다. Morrison(1996)에 의해 제시된 산화질소(NO)의 1차적인 산화반응은 다음의 식(2)와 (3)에 요약한 관계식과 같다[9].

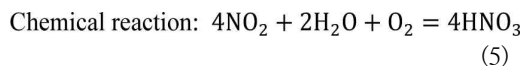


$$\text{Reaction rate: } -\frac{d[\text{NO}]}{dt} = +\frac{d[\text{NO}_2]}{dt} = 2k \cdot [\text{NO}]^2 \cdot [\text{O}_2] \quad (3)$$

NO 전환반응에서 대부분의 연구는 절대온도 T가 비례상수에 반비례하는 것으로 정의하고 있다[2, 3]. 다른 반응과 달리 식 (2)를 보면 낮은 온도에서 반응속도가 더 빠르게 진행되며, 이는 NO₂를 보다 많이 생성하게 하는 조건이 된다. 주로 사용되는 온도에 관한 상관성은 Atkinson과Baulch(1992)에 의해 수행한 시뮬레이션에서 제시된 Arrhenius방정이다[10].

$$\text{Rate constant: } k(\text{L}^2 \text{mol}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) = 1.2 \times 10^3 e^{530/T} \quad (4)$$

또한, 산성가스인 NO₂는 습한 공기 분위기에 서 불안정하며, 식 (5)와 같은 반응이 일어난다 [1].



England와 Corcoran(1974)은 수증기와 이산화질소 가스반응의 메커니즘에 대해 연구하였으며, 표준상태에서 3차 반응 상수는 5.5 (±0.29) × 10⁴ L²/mol²·sec이다[11].

유체역학 수치해석에서 다성분 흐름에 대한 알

고리즘을 질소산화물 오염물질 확산계산에 적용하였다. 난기류의 확산방정식은 다음과 같다[12, 13].

$$\text{Mass flux: } J_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (6)$$

$$\text{Diffusivity: } D_{i,m} = \frac{1-X_i}{\sum_{i,j \neq i} (X_j/D_{ij})} \quad (7)$$

$$\text{Diffusivity: } D_{ij} = 0.00188 \frac{[T^3(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j})]^{1/2}}{P_{abs} \sigma_{ij}^2 \Omega_D} \quad (8)$$

D : the diffusion coefficient for the species i, j and mixture

X and Y : the mole and mass fraction, respectively

T : is the absolute temperature

M : the molecular weight

P_{abs} : the absolute pressure

σ_{ij} : characteristic length

Ω_D : the diffusion collision integral

위의 식들로부터 273 K의 표준 대기상태에서 질소산화물과 다른 혼합 조성의 확산도를 계산하여 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Diffusivity of NO_x with gas component

i - j	Ω _D	D _{ij} (10 ⁻⁶ m ² /s)
NO ₂ -N ₂	1.085	1.458
NO ₂ -O ₂	1.103	1.443
NO ₂ -H ₂ O	1.610	1.551
NO ₂ -NO	1.135	1.423
NO-N ₂	1.005	1.739
NO-O ₂	1.020	1.736
NO-H ₂ O	1.423	1.898

2.3. 전산모델

Fig. 1은 본 연구의 대상인 경기도 일산소재 열병합발전소의 현장사진과 시뮬레이션 구성도이다. 발전소의 크기는 가로 1500 m, 세로 1000 m, 높이 500 m이다. 굴뚝은 높이 80 m, 내경 5 m이며, 대기흐름 유입 경계로부터 500 m 떨어진 곳에 위치하고 있다.

계산을 위한 경계조건은 물리적 모델을 기초로 유체의 흐름과 열(온도)을 변수로 설정하였으며,

자세한 조건은 Table 2에 요약했다.

지난 3년간의 연간 풍향과 풍속을 수집하여 Fig. 2에 바람장미 형태로 요약하였다. 연구대상 지역은 평균적으로 서풍의 영향이 가장 크며, 빈도가 높은 풍속은 3 m/s 이었다. 실제로 풍속은 풍속지수 방정식에 의한 정의에 의해 고도에 따른 변수로 지정하였다[14].

$$U_z = U_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^\alpha \quad (9)$$

본 연구는 지표면 10 m 높이에서 3 m/s의 평균풍속을 사용하였으며, 대기의 안정도는 0.2로 지정하였다[15]. 고도에 따른 수직 온도는 식 (10)을 이용하여 계산하였다.

$$T = T_0 - 6 * H \quad (10)$$

T₀ : the ground temperature (K)

H : the altitude (km)

공기의 온도와 바람의 속도에 관한 구배 분포를 Fig. 2 (b)에 나타나있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 일산에 설치된 높이 80 m, 내경 5 m인 열병합발전소 굴뚝을 대상으로 수행하였다. 열 회수를 위한 고효율 열교환기를 설치하기 전에 시뮬레이션 계산을 통해 배기가스의 온도를 40 °C로 낮추었을 경우에 대한 대기질 변화를 고찰하고자 하였다. 시뮬레이션에 적용된 일반적인 매개변수를 Table 3에 요약하였다. 굴뚝의 높이가 증가하면 총 배출압력은 감소하고, 동압은 증가하는 현상이 있으며, 배출가스의 온도는 중력 에너지와 운동에너지로 변환되면서 외부로 배출될 때는 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다. 유체역학의 유속분포에 의하면 굴뚝의 중앙부분 유속은 굴뚝 내측면에 비하여 상당히 높고, 중앙에서 방사형 방향으로 멀어질수록 감소한다. 또한 포화 증기압의 감소는 습도가 증가함에 따른 온도변화에 의한 것으로 짐작된다.

3.1. 배기가스 온도에 따른 NO₂ 생성 및 분산

보일러에서 연료의 고온 연소과정에서 생성되는 NO는 굴뚝 내부에서 부분적으로 NO₂로

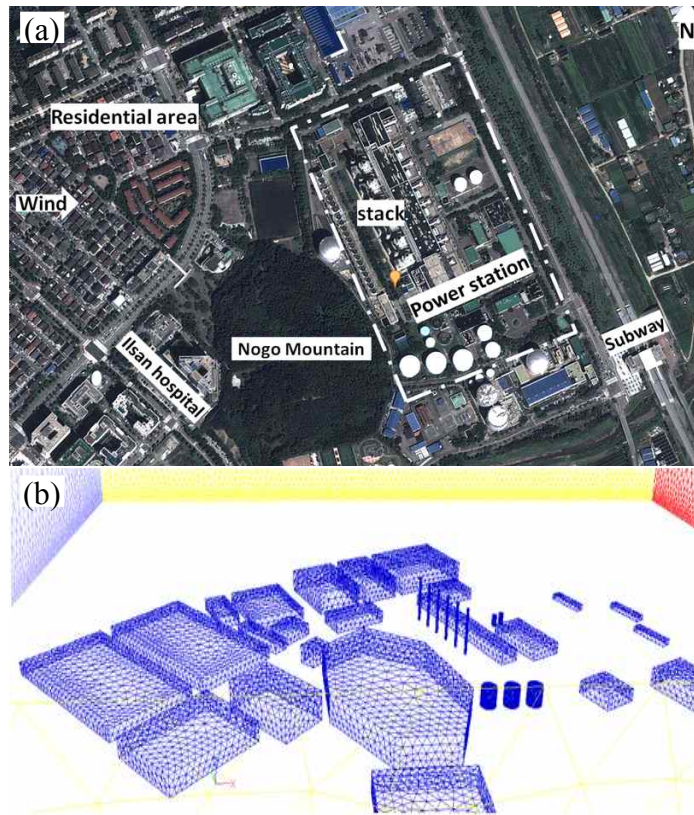


Fig. 1. Geographic model of the test power station: (a) local map; (b) mesh modeling.

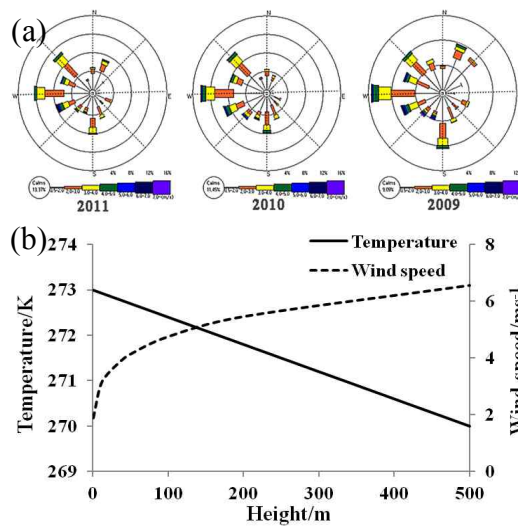


Fig. 2. Meteorology condition: (a) wind rose; (b) air temperature ($T_{\text{initial}} = 273 \text{ K}$) and wind speed gradient with height.

Table 2. Boundary conditions of calculation

Boundary	Types	Values
Left side	Vel. inlet	UDF—wind speed profile & air temp. gradient Species: H ₂ O—0.926%, NO—0 ppm NO ₂ —0 ppm, O ₂ —21%
Stack inlet	Vel. inlet	Z velocity : 20.5 m/s Initial temp.: 115 °C & 40 °C Species: H ₂ O—5.79 %, NO—60 ppm, NO ₂ —0.1 ppm, O ₂ —15.6 %
Ground & Wall	Wall	Standard wall functions & no slip
Right side	Outflow	Zero diffusion flux for all variables
Other sides	Symmetry	Zero normal velocity & no normal gradient

Table 3. Parametric variation at the inlet and outlet of stack center

	T _{in} /°C	T _{out} /°C Param eter	V _{in} /m·s ⁻¹	V _{out} /m·s ⁻¹	P _{in} /kPa	P _{out} /kPa	RH _{in} /%	RH _{out} /%
value	40	36	20.5	23.6	101.46	101.33	80	98

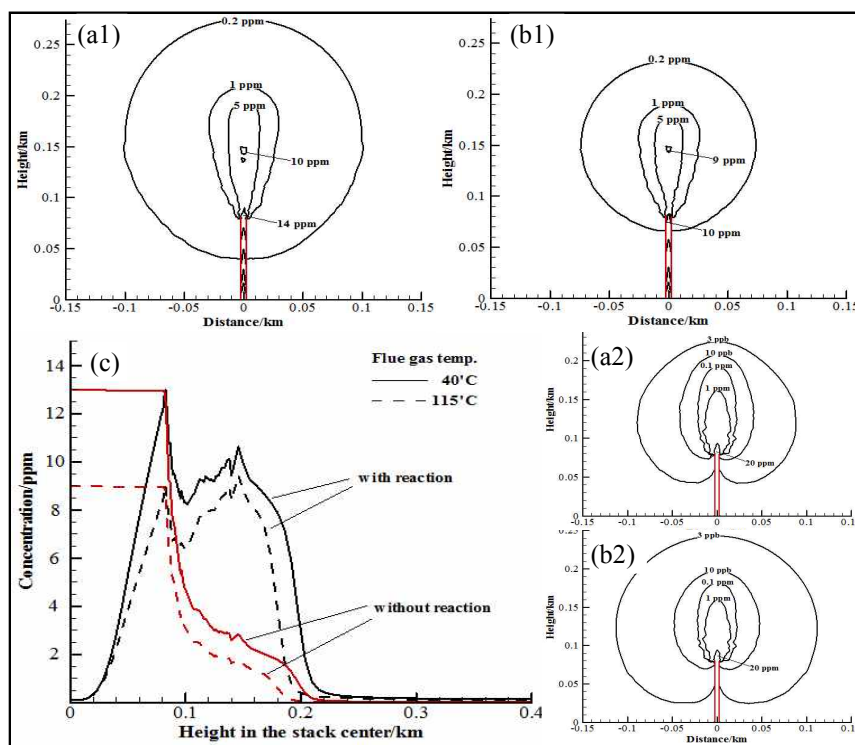


Fig. 3. NO₂ (a1, b1, c) and NO (a2, b2) concentration profiles in windless day with flue gas temperature: (a) 40 °C; (b) 115 °C.

전환될 수 있다. 굴뚝에서 발생하는 NO_2 농도 분포를 plume형태로 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3 (a1)과 (b1)은 바람이 없는 대기상태에서의 형상을 보여주고 있다. Fig. 3 (c)는 NO_2 의 전환반응이 있을 때와 반응을 고려하지 않은 경우에 대한 농도변화를 보여준다. 본 연구에서 초기 NO_2 의 농도는 굴뚝 하단부에서 0.1 ppm으로 설정하였다. 굴뚝 바닥에서부터 시작하여 상승하면서 지속적인 반응을 통하여 NO_2 의 농도가 점차 증가하여 굴뚝 출구에서 최대치에 도달하는 것을 알 수 있었다. 질소산화물을 포함하고 있는 배기가스는 굴뚝으로부터 대기 중으로 확산되면서 희석된다. 반응이 없는 과정과 비교했을 때, 굴뚝의 출구에서 화학적 반응과 희석이 동시에 일어나는 경우와는 다르게 나타났다. 고도 120 ~ 160 m에서 관찰한 질소산화물의 농도는 배출가스가 대기 중으로 확산되면서 2차 오염을 유발하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 40 °C의 배기가스에 포함된 NO_2 가 115 °C의 경우보다 더 높은 농도로 확산되고 있음을 알 수 있었다. 즉, 일반적으로

저온의 배출 조건에 대하여 살펴보면 산화질소의 전환반응속도가 크지만 분자의 공간확산 운동은 훨씬 낮아진다. 115 °C의 NO plume크기가 40 °C의 NO plume보다 큰 이유를 Fig. 3 (a2)와 Fig. 3 (b2)에서 볼 수 있다. 굴뚝 외부에서의 NO 농도는 3 ppb로 매우 낮으므로 주변 환경에 대한 영향은 무시할 수 있다.

바람은 배기가스 확산의 주요 기상요인이다. 대기의 흐름은 배기가스의 동적 에너지와 용량과는 비교된다. 인체와 환경에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 NO_2 의 우리나라 가이드 라인은 0.1 ppm이다. Fig. 4는 바람의 속도와 연소가스 속도에 따른 NO_2 확산량을 나타낸다. 직접적인 영향을 미치는 영역은 굴뚝에서 최대 115 °C일 때 지표면을 따라 470 m까지 이지만, 배기가스가 40 °C까지 냉각되고 풍속이 3 m/s가 되면 560 m 이상까지 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 4 (a), (b)). 굴뚝의 출구로부터 100 m 고도에서 횡단면을 관찰한 결과, 배기가스에 의해 형성되는 타원형의 분포형태가 저온에서 더 크고 길게 나타났다. 고온의 배기가스는 굴뚝에서 배출됨과 동

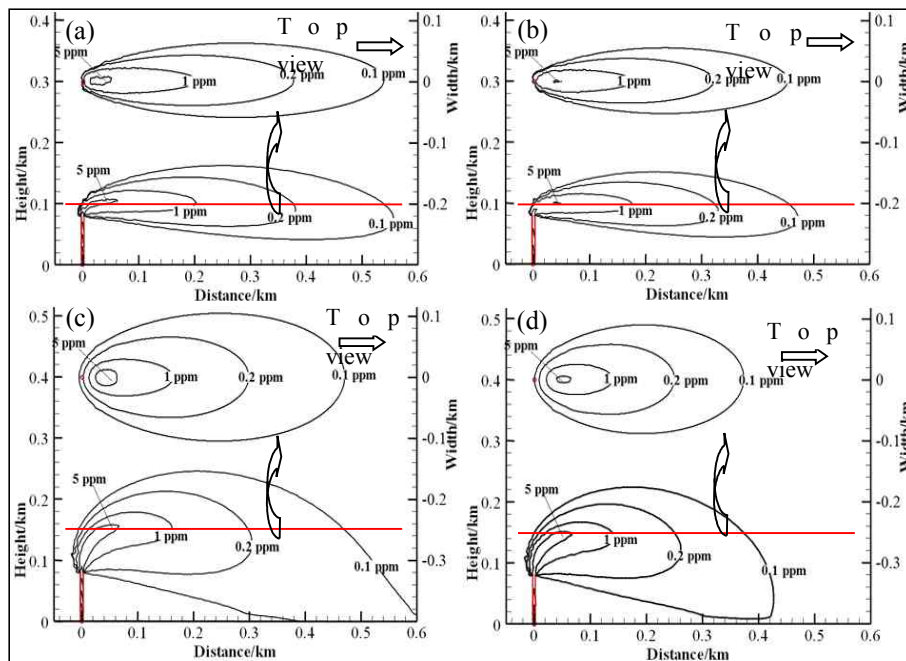


Fig. 4. NO_2 dispersion from top and front view with flue gas temperature and wind speed: (a) 40 °C, 3 m/s; (b) 115 °C, 3 m/s; (c) 40 °C, 1 m/s; (d) 115 °C, 1 m/s.

시에 바람에 의해 급속하게 대기 중으로 확산되면서 빠르게 희석되었다. Arrhenius의 방정식에 따르면 40°C에서 NO에서 NO₂로의 변환계수가 높아짐에 따라 차가운 배기가스는 더 많은 NO₂를 생성하게 된다. 굴뚝에서 생성되는 NO₂는 650 ~ 900 m 떨어진 곳에서 낙하하며, 115°C의 배기가스 보다 40°C 일 때 더 명확하게 발견된다.

만약 풍속이 1 m/s로 감소되면, 대기의 수평기류 강도가 줄어들게 되므로 수직으로 이동하는 양이 보다 증가하게 된다. 그러나 미풍은 배출가스가 배출원 가까이에서 떨어질 수 있는 가능성이 높다. 지면으로 낙하하는 오염물질은 인간에게 직접적으로 노출될 수 있는 바, 지면에 대한 영향의 범위는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 낮은 온도에서 380 ~ 600 m 정도인 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 지상으로부터 1.5 ~ 20 m 높이에 대한 NO₂의 농도분포곡선이다. 풍속과 배기가스의 온도에 따른 계산 결과로서 최대 농도가 정규분포와 같은 형태를 유지하고 있음을 알 수 있다 [16]. 또한 모든 경우에서 어느 한 점에서 고도에 따른 농도 값이 교차하는 것이 관찰되었다. 이것은 공간분포에 있어서 특정한 값의 농도 등치선이 있을 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 미풍인 상태에서 등치선은 배기가스 온도에 관계없이 굴뚝 근처에 오염물질이 최대로 모여있다.

한편, 바람은 오염물질의 확산에 직접적인 역할을 하는 것으로 관찰되었다. 시험대상 지역의 연평균 풍속은 3 m/s이다. 따라서 바람이 있는 시기의 배출가스 확산은 무풍일 때와 비교해보면 확연히 낮은 농도분포를 보이고 있음

을 알 수 있으며, 바람의 방향에 따라 빠르게 희석되는 것으로 파악된다.

NO₂의 공간농도분포를 조사하기 위해 중심선의 농도를 계산하여 Fig. 6에 표시하였다. 공간농도분포에 있어서 횡단면의 분포를 배출원으로부터의 거리에 따라 계산해보았다[17]. Y=0 plane (중앙)에서 최대 NO₂농도는 주 흐름선을 구성하는 모든 방향선에 대한 plume의 중심선이다. 이러한 관측결과 값을 통해 배출가스의 유동분포와 확산상태를 확인할 수 있다. 배출된 가스의 흐름곡선은 점점 더 물결모양으로 지면과 가깝게 내려가며, 이들의 상관관계는 다음의 식으로 규정지을 수 있다:

Flue gas temperature 40 °C:

$$y_H = -0.0002x^2 + 0.0587x + 98.466 \quad (11)$$

Flue gas temperature 115 °C:

$$y_H = -0.0002x^2 + 0.0397x + 96.589 \quad (12)$$

y_H : the height with maximum concentration (m)

x : the downstream distance of the stack (m)

농도분포를 살펴보면 처음 100m에서 빠르게 감소했으며, 이후 천천히 줄어들었다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

Flue gas temperature 40 °C:

$$y_c = 6.3524e^{-0.007x} \quad (13)$$

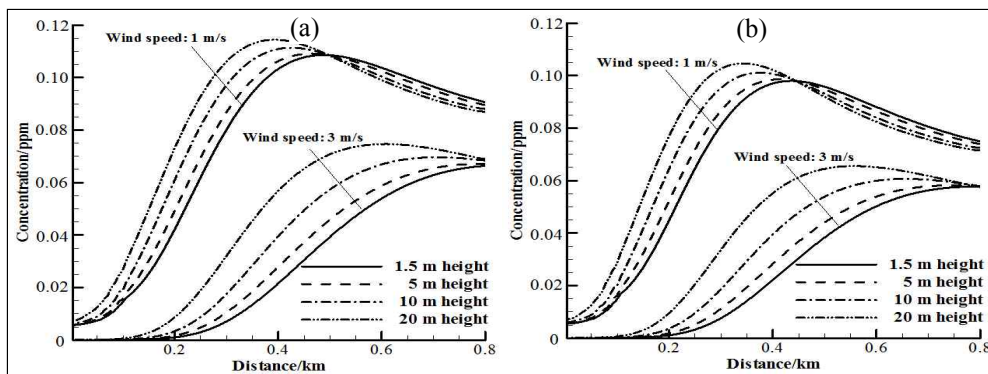


Fig. 5. NO₂ concentration profiles based on altitude and wind speed with flue gas temperature: (a) 40 °C; (b) 115 °C.

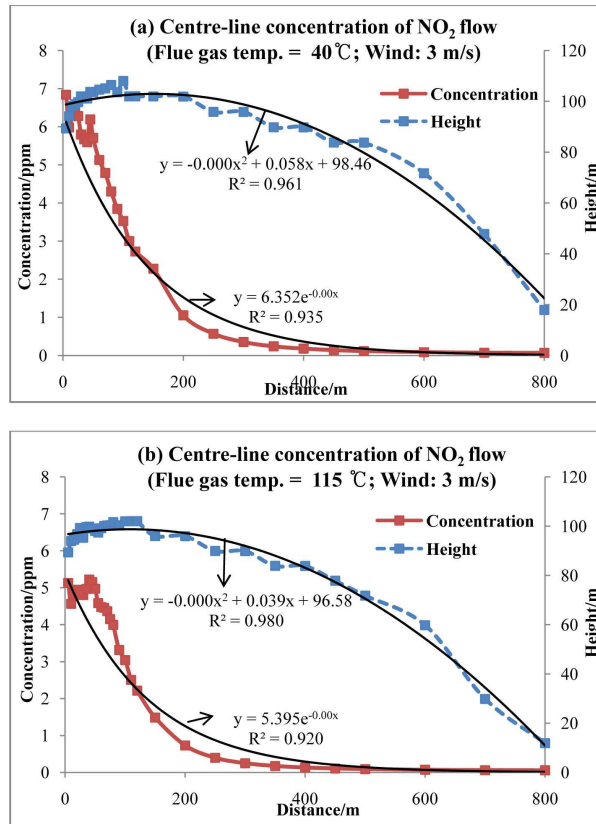


Fig. 6. Centre-line concentration of NO₂ main flow at Y=0 plane with flue gas temperature:
(a) 40 °C; (b) 115 °C.

Flue gas temperature 115 °C:

$$y_c = 5.3954e^{-0.007x} \quad (14)$$

y_c : the maximum concentration (ppm)

식 (11)과 식 (12), 식 (13)과 식 (14)를 비교하면, 40 °C의 경우가 115 °C 일 때 보다 높은 y_H 와 y_c 의 값을 생성하여 더 큰 계수를 갖는다. 즉, 저온에서 오염물질의 확산이 지연되고 있음을 암시한다. 현실적으로 적용하기 편리한 NO₂의 농도를 추정하기 위하여 두 종류의 방정식을 결합시켜 중심선에서 NO₂의 농도를 예측할 수 있었다.

3.2. NO₂ 분산에 대한 습도의 영향

높은 습도 조건 혹은 안개 낀 날 굴뚝의 출구에서 plume이 더 선명하게 나타난다[18, 19]. 이

는 발생원 주변의 과포화된 수분이 상대적으로 큰 물방울을 구성하기 때문에 눈에 띄는 백색의 plume을 형성하게 되는 것이다. NO₂ plume의 확산량에 대한 상대습도의 영향을 조사하기 위하여 배출가스 몸체의 0.1 ppm 농도부분을 추출하여 위치별로 도시해보았다 (참고, Fig. 7). 굴뚝 주변의 높은 습도 지역에서 발생하는 가시적인 plume은 수증기의 영향을 부분적으로 받지만 질소산화물의 이동에 직접적인 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. 본 연구에서 설정한 10%, 40%, 80%의 상대습도에 대해 NO₂의 확산도는 그림에서 볼 수 있듯이 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다[20].

다습한 대기에서 NO₂는 습기와 반응하여 산성 안개를 형성할 수 있다. 본 연구에서는 질소산화물이 배출가스에 포함되어 있는 수분이나 습한

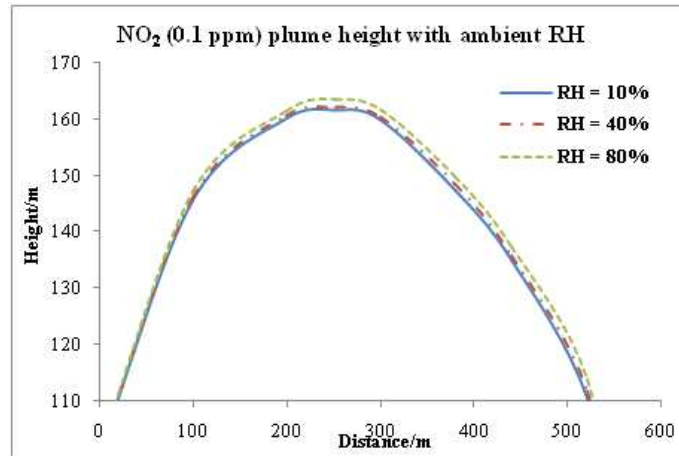


Fig. 7. NO₂ plume height indicating 0.1 ppm with ambient RH (10 %, 40 % and 80 %).

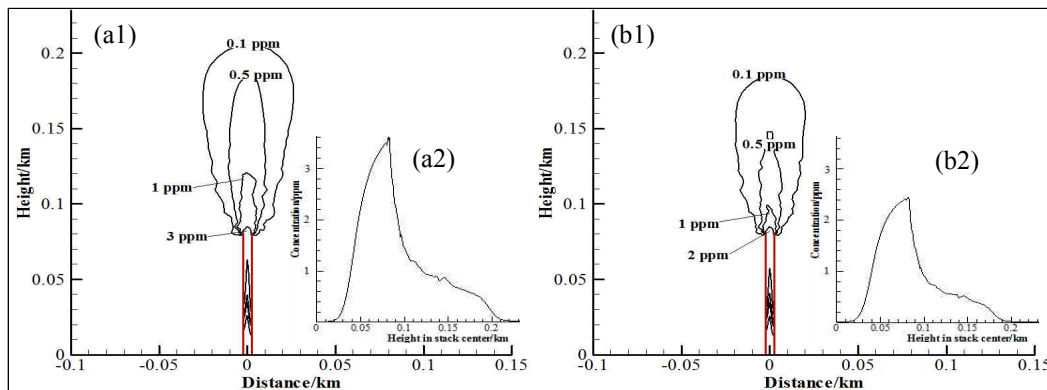


Fig. 8. HNO₃ mist concentration profiles in windless condition with flue gas temperature: (a) 40 °C; (b) 115 °C (The detailed figures (a2, b2) are the concentration distribution in stack centre-line).

대기중의 물과 반응하여 질산을 생성하는 정량적 평가를 고찰하였다. Fig. 8은 질산(HNO₃)의 농도분포를 배출가스의 온도에 따라 도시한 결과이다. Fig. 8 (a2)와 (b2)는 굴뚝 중심축의 농도별 분포곡선을 상세히 설명하고 있다. 산성 미스트는 40 °C의 배출가스 온도에서 굴뚝출구에서 발생하여 중앙으로부터 좌우로 25 m까지 확장되고 있음을 볼 수 있으며, 농도가 0.1 ppm까지 희석되면서 200 m높이까지 상승하였다. 굴뚝 내부에서의 가로축 질산농도는 내측 벽면에서 가장 높게 나타났으며, 최고 4 ppm까지 도달하는 것으로 보인다.

Fig. 9는 주변 바람에 따른 배출가스의 이동

및 확산모습을 보여주고 있다. 40 °C의 배출가스에서 0.1 ppm의 질산증기는 길이 170 m, 폭 40 m, 두께 40 m의 타원형을 구성하고 있다. 반면에 115 °C의 배출가스는 동일한 NO 농도임에도 불구하고, 약 120 m 정도의 가로축 영향권을 보여주는 것을 미루어보아 저온에서의 질산생성이 두드러지는 것을 알 수 있다.

4. 결론

경기도 일산에 설치된 열병합발전소의 높이 80 m, 내경 5 m인 굴뚝에 대하여 열회수에 의해 배

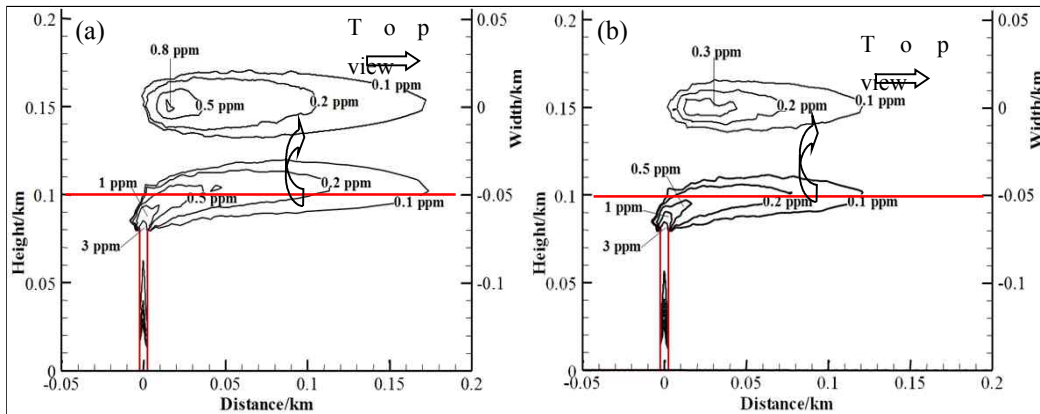


Fig. 9. Views of HNO_3 mist at 3 m/s wind speed with flue gas temperature: (a) 40 °C; (b) 115 °C.

기가스 온도가 115 °C에서 40 °C로 낮아지면, 지표 환경에 영향을 미칠 것을 예상하여 이에대한 수치해석을 실시하였다. 질소산화물의 반응속도는 온도와 반비례하기 때문에 보다 많은 양의 이산화질소가 생성될 것으로 추정하였으며, 낮은 온도는 분자의 움직임을 더디게 하여 보다 큰 NO_2 의 plume을 생성한다.

1. 배출가스가 직접적인 영향을 미치는 영역은 115 °C일 때, 굴뚝에서부터 최대 지상의 470 m 까지이며, 배출가스의 온도가 40 °C로 낮아지고, 3 m/s의 풍속 조건이 되면 560 m 이상 영향을 준다.
2. NO_2 의 공간농도분포를 관찰한 결과, 굴뚝으로부터의 수평 이격거리의 어느 한 점에서 고도에 따른 농도값이 교차하였으며, 미풍인 상태에서 굴뚝 근처에서 오염물질의 농축이 예상되었다.
3. NO_2 는 습한 공기의 산성 미스트와 반응하여 굴뚝 내벽의 상부에서 최고 산 농도 4 ppm까지 도달하였다.
4. 길이 120 m인 타원형의 plume은 열회수 후 170 m까지 증가하였으며, 저온의 가스는 직접적으로 대기와 거주자에게 영향을 준다고 추측할 수 있다. 따라서 질소산화물의 농도 또는 습기에 추가적인 조치가 열 교환기를 적용하기 전에 실시하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 전력 생산 및 수공예 관한 2011년도 프로그램 (2011T100200186)으로 지원되었기에 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Finlayson, J.B., Pitts, N.J. (2000). *Chemistry of the upper and lower atmosphere*. Academic press, a Harcourt Science and Technology Company, p. 264, 268-272.
2. Baulch, D.L., Drysdale, D.D., and Horne, D.G. (1973). *Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions*, Vol.2, Homogeneous Gas Phase Reactions of the H_2 - N_2 - O_2 System, London, p. 285-300.
3. Tsukahara, H., Ishida, T., and Mayumi, M. (1999). Gas-phase Oxidation of Nitric Oxide: Chemical Kinetics and Rate Constant. *Biol. Chem.* 3: 191-198.
4. Yousif, S.A., Salem, A.A., Nassar, Y.F. and Bader, I.F. (2006) Investigation of pollutants dispersion from power stations. *Int. J. Energy Res.* 30: 1352-1362.

5. Freddy, W.L., Sentian, J., Radojevic, M., Tan, C.L. and Halipah, S. (2007). Computer simulated versus observed NO₂ and SO₂ emitted from elevated point source complex. *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 4: 215-222.
6. Konig, C.S., Mokhtarzadeh-Dehghan, M.R. (2002). Numerical Study of Buoyant Plumes from a Multi-flue Chimney Released into an Atmospheric Boundary Layer. *Atmos. Environ.* 36: 3951-3962.
7. Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method (Second Edition)*. Longman, New York, p. 1-38.
8. Patankar, S.V., Spalding, D.B. (1972). A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-dimensional Parabolic Flows. *Int. J. Heat Mass Transfer* 15: 1787-1806.
9. Morrison, M.E., Rinker, R.G., and Corcoran, W.H. (1996). Rate and Mechanism of Gas-phase Oxidation of Parts-per-million Concentrations of Nitric Oxide. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 5: 175-181
10. Atkinson, R., Baulch, D.L. (1992). Evaluated Kinetic and Photochemical Data for Atmospheric Chemistry, Supplement IV: IUPAC Subcommittee on Gas Kinetic Data Evaluation for Atmospheric Chemistry. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 21: 1125-1568.
11. England, C., Corcoran, H.W. (1974). Kinetics and mechanisms of the gas-phase reaction of water vapor and nitrogen dioxide. *Ind. Eng. Chem., Fundam.*, Vol. 13, No. 4, 373-384.
12. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N. (2002). *Transport phenomena*, John Wiley & Sons, Inc., second edition.
13. Poling, B.E., Prausnitz, J.M., and O'Connell, J.P. (2007). *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, International Edition, 5th Edition.
14. Peterson, E.W., Hennesse, J.P. (1977). On the Use of Power Laws for Estimates of Wind Power Potential, *J. Appl. Mete.* 17: 390-395.
15. Irwin, J.S. (1979). Estimating Plume Dispersion-A Recommended Generalized Scheme, in Preprints of *Fourth Symposium on Turbulence, Diffusion and Air Pollution*, American Meteorological Society, 62-69.
16. Toncu, D.C., Bogoi, A., Stanciu, V. and Danaila, S. (2011). Solving SO₂ dispersion from combustion flue gas using plume reflection on the ground for continuous point source model. *U.P.B. Sci. Bull., Series D.* 73: 71-84.
17. Contini, D., Robins, A. (2004). Experiments on the rise and mixing in neutral crossflow of plumes from two identical sources for different wind directions. *Atmos. Environ.* 38: 3573-3583.
18. Spillane, K.T., Elsum, C.C. (1982). Prediction of cloud effects in chimney plumes. *Atmos. Environ.* 17: 983-990.
19. VanReken, T.M., Nenes, A. (2009). Cloud formation in the plumes of solar chimney power generation facilities: A modeling study. *J. Sol. En. Eng.* 131: 1-10.
20. Brown, J., Fletcher, D.F. (2005). CFD Prediction of Odour Dispersion and Plume Visibility for Alumina Refinery Calciner Stacks. *Process Saf. Environ.* 83(B3): 231-241.