

## 열병합발전소 질소산화물 확산에 관한 전산유체역학 simulation 연구

김지현 · 박영구<sup>†</sup>

강원대학교 환경공학과  
(2015년 2월 10일 접수; 2015년 2월 20일 수정; 2015년 3월 25일 채택)

### Study on Computational Fluid Dynamics(CFD) simulation for NO<sub>x</sub> dispersion around combined heat and power plant

Ji-Hyun Kim · Young-Koo Park<sup>†</sup>

*Dept. of Environmental Engineering, College of Engineering, Kangwon National University  
(Received February 10, 2015; Revised February 20, 2015; Accepted March 25, 2015)*

**요약** : 세계적으로 급증하는 전력수요에 대처하고, CO<sub>2</sub> 배출을 줄이고자 인구가 밀집되어 있는 도심지에 복합화력 발전소가 건설되고 있다. 환경규제가 계속적으로 강화됨에 따라 NO<sub>x</sub> 배출량을 줄이고자 저 NO<sub>x</sub> 버너, SCR 등 여러 가지 설비들을 설치하고 있다.

본 연구는 경기도 고양시 소재의 일산열병합발전소 1개소에서 배출되는 질소산화물을 TMS를 이용하여 배출계수를 산정하여 이를 전산유체동역학(CFD)에 적용하여 질소산화물의 거동을 살펴보고, 현장 실측 결과와 비교 검토하였다.

실측 기간 중 측정 시간에 따른 주 풍향·풍속의 순간적인 변화로 인해 실측 결과와 CFD 모델링 결과의 차이가 나타날 수 있으나, 모델링 결과와 실측 결과는 대부분 예측지점에서 유사한 농도로 나타났다. 향후 주변농도를 고려한 기여농도를 산출하여 실측농도에 가까운 예측농도 도출이 가능 할 것으로 판단된다.

**Abstract** : In order to deal with the globally increasing electric power demand and reduce CO<sub>2</sub> emission, complex thermoelectric power plants are being constructed in densely populated downtown areas. As the environmental regulations are continuously strengthened, various facilities like low NO<sub>x</sub> burner and SCR are being installed to reduce NO<sub>x</sub> emission.

This study is applied using the TMS emission of NO<sub>2</sub> from combined heat and power plant located in Goyang-si Gyeonggi-do. Applying data to the computational fluid dynamics(CFD), and compared with the actual measurement results.

It is judged that even though there might be differences between actual measurements and CFD results due to the instant changes of wind direction and wind speed according to measurement time during measurement period, modeling results and actual measurement results showed similar

---

<sup>†</sup>Corresponding author  
(E-mail: ygpark@kangwon.ac.kr)

concentration at most forecasting areas and therefore, the forecasting concentration could be deducted which is close to actual measurement by calculating the contribution concentration considering the surrounding concentration in the future.

Keywords : power plants, CFD, Fluent, nitrogen dioxide

### 1. 서론

최근 전력수요 증가 및 CO<sub>2</sub> 배출량 감소에 따른 열병합발전소 설치가 증가되며, 인구 밀집지역에 건설로 인한 배가스 처리기술의 고도화가 요구되고 있다. 미국 및 일본 등의 신규 복합발전설비는 배가스 처리설비 중 SCR 설치를 통해 질소산화물 배출농도를 5 ppm 이하로 운영하고 있으며, 현재 건설되어있는 복합화력발전소 또한 배출허용기준 강화 및 총량규제를 통해 질소산화물 배출량을 줄이고자 저 NOx 버너 또는 SCR을 추가 설치해 지속적인 오염물질 저감에 노력을 기울이고 있다.

오염물질 저감을 위한 배가스 처리설비 추가 설치를 위한 기초자료로 modeling을 통한 오염물질 예측이 요구되며, modeling은 물질의 이동 및 흐름을 과학적으로 이해하고 개발계획과 대기 개선에 따른 정책수립의 기초자료로 활용된다. 또한, 오염물질 확산분포 분석을 통해 궁극적으로 오염물질 발생원에서 시간과 공간에 따른 오염물질농도 예측이 가능하다.

최근 컴퓨팅 계산 능력이 발전하면서 수치모델의 모델링 영역과 모델결과의 이용분야가 점점 다양해지고 있으며, 시나리오별 저감 잠재량, 이행시기, 이행률 등을 종합적으로 검토하여 오염물질 저감 목표를 설정하는데 사용된다. 또한, 전산유체역학을 이용한 오염물질 확산모사를 통해 오염물질 감소로 주변지역 기여율을 확인할 수 있으며, 여러 시나리오 비교 평가를 통해 감축 가능성 및 목표설정이 용이해졌다.

본 연구에서는 경기도 고양시 일산 열병합발전소 1개소에서 배출되는 질소산화물 배출조건을 기준으로 전산유체역학을 이용한 오염물질 확산분포를 예측하고, 실측을 통해 비교 평가함으로써 오염물질 배출 변화에 따른 주변지역 기여율 변화를 평가하였다.

### 2. 실험

#### 2.1. 지배방정식

본 연구에서는 SIMPLER method를 적용한 열유동 화학반응 해석코드 Fluent를 사용하였으며, 격자는 약 7만 개의 정렬격자로 구성하였다.

오염물질 확산은 일반적인 상변화, 화학반응, 대류 및 복사에 의한 열전달과 층류 및 난류 등의 복합적인 변화를 내포하고 있어 이에 따른 적절한 방정식이 요구된다. 따라서 상변화 및 화학반응 예측을 위한 함수는 혼합분율/확률밀도 함수 (Mixture Fraction/Probability Density Function, PDF)를 사용하였으며, 유동장 및 온도 해석을 위해 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식을 사용하였다.

기존 연구에 의해 사용되어진 방정식을 토대로 각각의 지배 방정식은 다음과 같다[1].

#### Conservation of Mass

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

#### Conservation of Momentum

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\tau_{ij} = [\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

#### Conservation of Energy

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k_e \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + Sh \quad \dots\dots\dots(3)$$

#### Conservation of Species

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(J_{i,i}) + S_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$J_{i,i} + \rho D_{i,m} \frac{\partial m_i}{\partial x_i}$$

**k-ε Turbulence Model**

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$$

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad C_1 = 1.44, \\ C_2 = 1.92$$

**Radiation Model (DTRM)**

$$\frac{dI}{ds} = -(a_s - a_{abs}) I + a_{abs} \frac{\sigma T^4}{\pi} \dots\dots\dots(6)$$

**The equation of state**

$$\rho = \frac{p}{RT \sum_j m_j / M_j} \dots\dots\dots(7)$$

**2.2. modeling 영역 설정**

본 연구는 실제 현장의 공간적 구성과 유사한 조건을 위해 발전소 굴뚝에서부터 전후 수평거리 1,500, 5,000 m와 지표면에서부터 수직 높이 3,500 m까지 지정하였으며, 연돌 높이는 80 m, 직경은 3.5 m로 설정하였다. 또한, 규칙적 지형 구조에 따라 총 75,540개의 정렬격자를 사용하였으며, CFD domain 조건 및 지형적 구조를 Table 1과 Fig. 1에 나타냈다.

Table 1. domain condition

Item	X(m)	Y(m)	Z(m)
Domain	6500	3000	3500
Mesh	75,540		

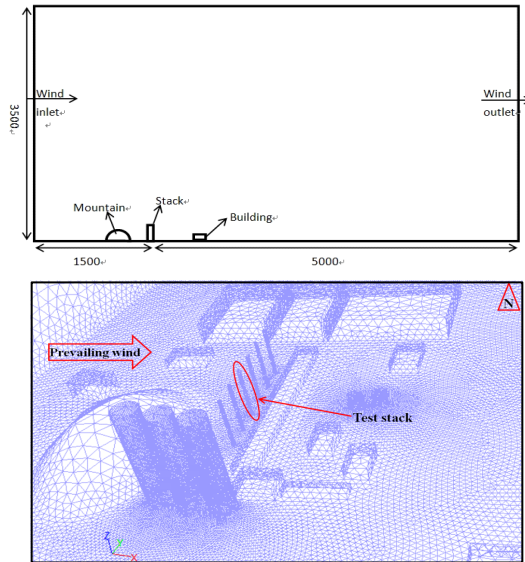


Fig. 1. geographic model of the power plant.

**2.3. 풍속 및 오염물질 조건 설정**

열병합발전소 주변 풍속변화 및 오염물질 배출 농도 변화에 따른 오염물질 확산 모사를 위한 조건설정을 Table 2에 나타냈다.

발전소 주변 풍속 변화에 따른 오염물질 확산 모사를 위한 조건인 case 1과 case 2는 풍속이 각각 1.0 m/s와 5.0 m/s일 때의 오염물질 확산 분포를 도출하였으며, 오염물질 배출량 감소에 따른 주변지역 오염물질 확산분포 변화를 도출하기 위해 case 3과 case 4로 나타냈다.

Table 2. boundary conditions of calculation

item		condition			
		case 1	case 2	case 3	case 4
air composition	velocity	1.0 m/s	5.0 m/s	3.0 m/s	3.0 m/s
	direction	X			
	O <sub>2</sub>	21%			
	N <sub>2</sub>	79%			
	H <sub>2</sub> O(water vapor)	0.926 %			
gas composition	velocity	20.5 m/s			
	direction	Z			
	O <sub>2</sub>	15.6 %			
	H <sub>2</sub> O(water vapor)	5.79 %			
	NO <sub>2</sub>	60 ppm	60 ppm	60 ppm	10 ppm

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 풍속변화에 따른 CFD simulation 결과

열병합발전소 주변 풍속변화에 따른 오염물질 확산모사 결과를 Fig. 3에 나타냈다.

오염물질 최대 상승높이는 case 1과 case 2가 각각 150 m, 100 m로 나타났으며, 일반적으로 풍속에 따른 오염물질 최대 상승높이는 반비례 관계를 나타냈다.

굴뚝 출구로부터 최고 농도지점 횡단면 관찰 결과, 배출가스에 의해 형성된 타원형의 오염물질 확산 분포는 case 1보다 case 2에서 더 넓은 분포로 나타났으며, 풍속이 작을수록 오염물질 최대 상승높이는 증가하였다. 또한, 풍속이 클수록 오염물질 확산거리는 증가하였으며, 이는 풍속의 크기에 따른 오염물질 확산에 효과적임을 알 수 있

다.

Fig. 4는 풍속 변화에 따른 오염물질 최대 도달거리 및 착지 농도지점을 나타냈다.

case 1(풍속 1.0 m/s)은 굴뚝으로부터 약 250 m부터 약 800 m 까지 주요 분포지역으로 나타났으며, case 2(풍속 5.0 m/s)는 굴뚝으로부터 약 500m부터 약 1,800m로 나타났다.

오염물질 도달거리와 최대농도 착지지점은 풍속에 비례하였으며, 최대 착지농도와 오염물질 상승 높이는 풍속에 반비례한 것으로 나타났다.

일반적으로 오염물질 확산은 배출가스 온도와 유속, 풍향 및 풍속에 절대적이며, 배출가스 온도와 유속이 클수록 확산에 효과적이다. 또한, 풍속이 클수록 오염물질 확산에 유리하나, 배출가스 유속과 온도에 따라 최대 착지지점이 오염물질 배출원과 가깝게 나타날 가능성이 있다.

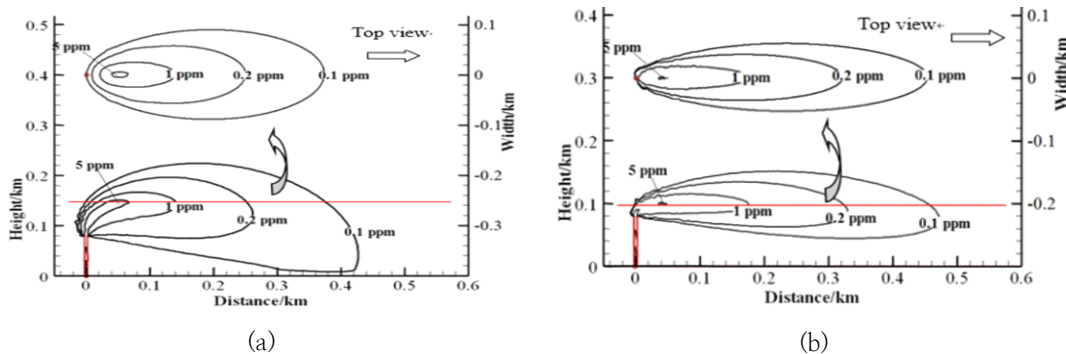


Fig. 3. the height with maximum concentration(a:case 1, b:case 2).

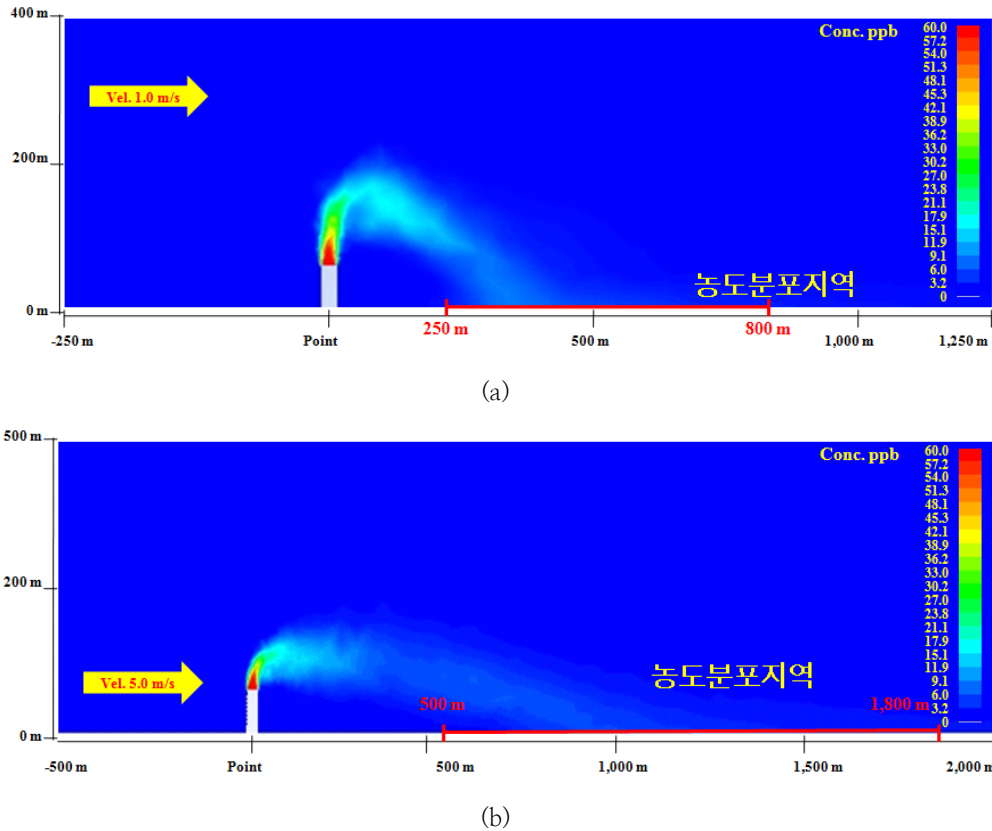


Fig. 4. pollutants average distribution area(a:case 1, b:case 2).

인체와 환경에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 NO<sub>2</sub>의 대기환경기준은 1시간 평균 100 ppb로 직접적인 영향을 미치는 영역은 굴뚝에서 풍속이 1.0 m/s일 때 지표면을 따라 250 m ~ 800 m, 풍속 5 m/s일 때 500 m ~ 1,800 m까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이는 일정한 풍향과 평균 풍속 1.0 ~ 5.0 m/s의 바람이 지속적으로 작용한다고 가정했을 때, 1개 이상의 연돌로 구성된 일산 열병합발전소 반경 1 km 이내 NO<sub>2</sub> 환경기준인 100 ppb를 상회할 것이라 판단된다.

**3.2. 배출농도변화에 따른 CFD simulation 결과**

발전소 내 SCR 설치 전·후 오염물질 배출량 변화에 따른 확산모사결과를 Fig. 5에 나타냈다.

오염물질 변화에 따른 확산모사 결과 case 3 (배출농도 60 ppm)은 대상지역 내 평균 50 ppb

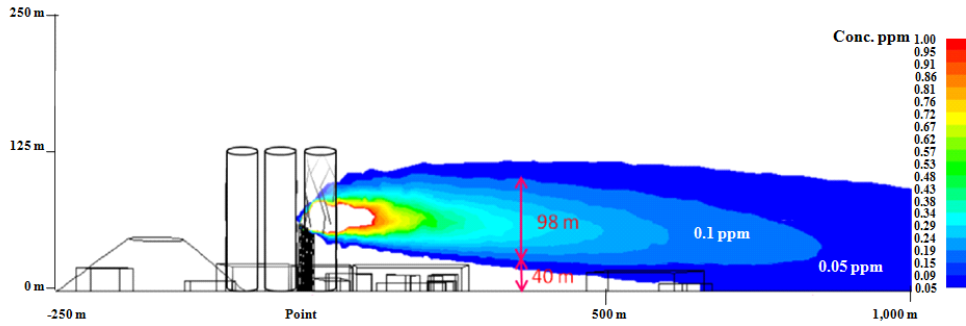
로 나타났으며, case 4(배출농도 10 ppm)는 case 3보다 약 80 % 이상 감소된 평균 8 ppb로 나타났다.

발전소 주변지역 영향예측지점의 NO<sub>2</sub> 농도분포 산출을 위해 오염물질 확산모사 중심선의 농도를 이용하여 거리별 오염물질 농도를 Fig. 6에 나타냈으며, 배출원으로 부터 대상지점 간 거리에 따른 오염물질 예측농도를 산출하였다.

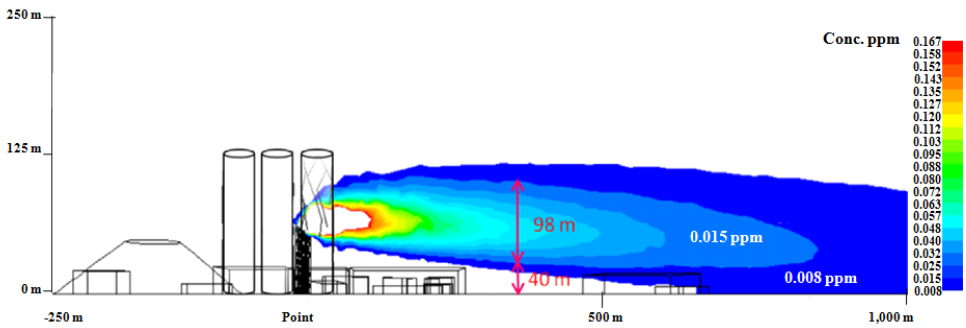
오염물질 농도는 발전소와의 이격 거리 100 m 부터 급격히 감소하였으며, 100 m 이후 지점부터 감소폭은 낮아졌다. 이의 상관 식 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Flue gas Concentration } 60 \text{ ppm: } C_{60} = 6.3524e^{-0.007x} \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{Flue gas Concentration } 10 \text{ ppm: } C_{10} = 5.3954e^{-0.007x} \dots\dots\dots(9)$$

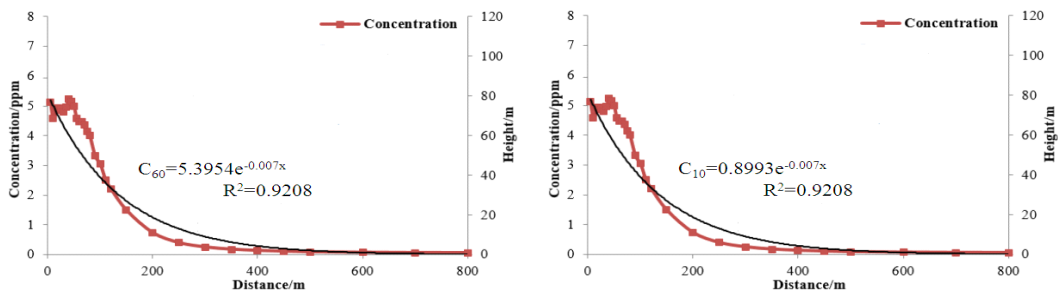


(a)



(b)

Fig. 5. NO<sub>2</sub> dispersion simulation results(a:case 3, b:case 4).



(a)

(b)

Fig. 6. pollutant reduce curve(a:case 3, b:case 4)

Table 3. simulation results according to changed NO<sub>2</sub> concentration (ppb)

구분	distance (m)	case 3 (flue gas Conc. 60 ppm)	case 4 (flue gas Conc. 10 ppm)
A-1	650	57.0	9.5
A-2	580	93.1	15.5
A-3	820	17.3	2.9
A-4	430	265.9	44.3
A-5	540	123.1	20.5

Table 5 actual measurement results (ppb)

	1st	2nd	3rd
A-1	45.28	60.93	16.65
A-2	94.33	64.45	12.73
A-3	37.19	77.08	8.88
A-4	14.14	57.85	9.31
A-5	95.63	56.27	8.23

상관식을 이용한 예측지점별 농도 산출 결과를 Table 3에 나타냈다.

산출 결과 case 3와 case 4 모두 직선거리의 배출지점에서 가까운 A-4에서 각각 265.9, 44.3 ppb로 가장 높게 나타났으며, 배출지점에서 멀리 위치한 A-3에서 각각 17.3, 2.9 ppb로 가장 낮게 나타났다.

**3.3. Simulation 및 실측 비교 결과**

**1) 실측 대상지역 및 예측지점**

대상지역 내 예측지점은 배출지점에서 반경 1 km 이내 총 5개 지점을 선정하였으며, Fig. 7과 Table 4에 나타냈다

**2) 실측 결과**

대상지점 별 오염물질 측정 결과를 Table 5에

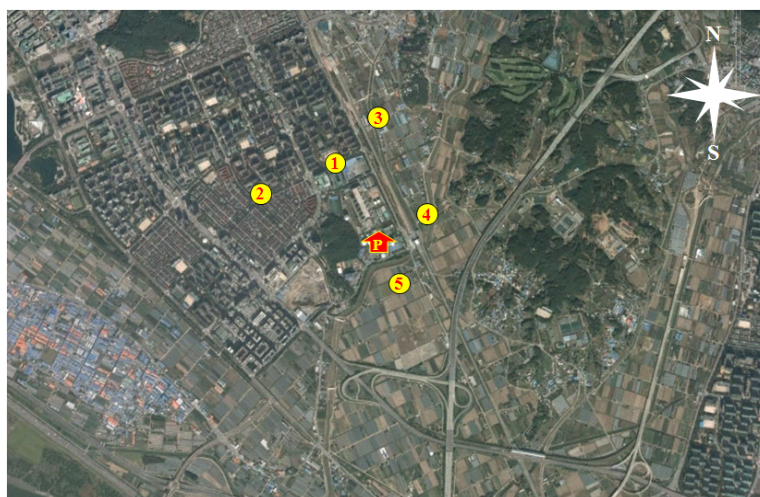


Fig. 7. predicted point around the Ilsan power plant.

Table 4. forecast Point

No.	point name	address
A-1	백마고등학교	경기도 고양시 일산동구 백석동 1138
A-2	백석동 노인정	경기도 고양시 일산동구 백석1동 156번지
A-3	상가	경기도 고양시 일산동구 풍동 524-4
A-4	예원교회	경기도 고양시 일산동구 풍동 545-5
A-5	민가	경기도 고양시 덕양구 내곡동 118-5

나타냈다.

질소산화물 실측 결과 1, 2차 평균 A-2가 가장 높은 79.4 ppb로 나타났으며, A-5가 76.0 ppb로 뒤를 이었다. A-4는 1차 측정결과 타 지점에 비해 월등히 낮은 14.14 ppb로 나타났으나, 이는 오염물질 측정 시 순간적인 풍향·풍속의 영향으로 낮게 나타났을 것이라 판단된다.

case 3의 A-1 CFD 결과 및 실측결과 오차율은 6.8 %로 매우 낮게 나타났으며, A-2 또한 14.7 %로 낮게 나타났다. 또한, A-4와 A-3의 오차율 각각 86.5 %, 69.7 %로 매우 높게 나타났으며, A-4와 A-3 지점을 제외한 3개 지점의 평균 오차율은 19.9 %로 매우 낮게 나타났다.

case 4의 CFD 및 실측 비교 결과 A-2 지점을

Table 6. compare CFD modeling results with actual measurement

	Case 3 (Flue Gas Conc. 60 ppm)		Case 4 (Flue Gas Conc. 10 ppm)	
	CFD modeling results	actual measurement	CFD modeling results	actual measurement
A-1	57.0	53.1	9.5	16.65
A-2	93.1	79.4	15.5	12.73
A-3	17.3	57.1	2.9	8.88
A-4	265.9	36.0	44.3	9.31
A-5	123.1	76.0	20.5	8.23

SCR 설치 후 측정 결과 모든 지점에서 설치 전 측정결과에 비해 평균 81% 감소하였으며, 이는 SCR 설치 후 약 83 %의 오염물질 배출농도 감소에 따른 영향으로 판단된다.

### 3) 1, 2차 CFD/실측 결과 비교평가

오염물질 배출량 변화에 따른 CFD 결과와 예측지점 실측자료를 Table 6에 나타냈다.

CFD 모사결과 및 실측자료 비교결과 A-1은 유사한 결과로 나타났으며, A-4를 제외한 전 지점에서 유사한 농도분포 경향이 나타났다.

제외한 대부분 지점에서 평균 오차율 62.3 %로 매우 높게 나타났다. 또한 case 3(배출농도 60 ppm)의 경우 실측 결과보다 CFD 모사결과가 높게 나타났으나, case 4는 실측결과가 CFD 모사결과 보다 높게 나타났다. 이는 case 3의 고농도 오염물질 배출은 확산에 따른 배경농도의 영향을 무시할 수 있으나, 저농도 오염물질 배출 시 실측 결과는 배경농도 영향에 의한 상승으로 판단된다.



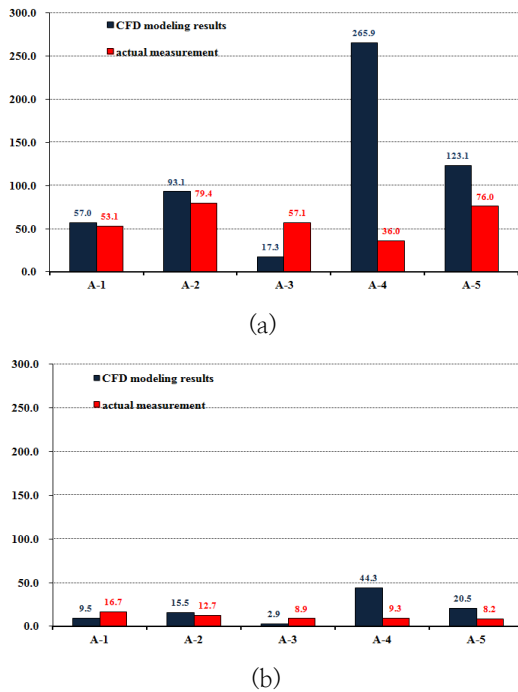


Fig. 8. compare CFD modeling results with actual measurement(a:case 1, b:case 2).

#### 4. 결론

복합화력발전소 주변 풍속변화 및 오염물질 배출농도 변화에 따른 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 CFD 모사 및 실측 비교결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 오염물질 도달거리와 최대농도 착지 지점은 풍속에 비례하였으며, 최대 착지 농도와 오염물질 상승 높이는 풍속에 반비례한 것으로 나타났다.

2) 일정한 풍향과 평균풍속 1.0 ~ 5.0 m/s의 바람이 지속적으로 작용한다고 가정했을 때, 1개 이상의 연돌로 구성된 일산열병합발전소 반경 1 km 이내 NO<sub>2</sub> 환경기준인 100 ppb를 상회할 것이라 판단된다.

3) 배출원으로 부터 대상지점 간 거리에 따른 오염물질 농도분포에 대한 상관식은 다음과 같다.

Flue gas Concentration 60 ppm:  

$$C_{60} = 6.3524e^{-0.007x}$$

Flue gas Concentration 10 ppm:  

$$C_{10} = 5.3954e^{-0.007x}$$

4) CFD simulation 결과 배출농도가 83 % 감소함에 따라 대상지점 오염물질 착지농도 또한 약 6배 감소되었으며, 실측 결과 또한 약 81 % 이상 감소하였다.

측정기간 중 지점별 풍향-풍속에 따른 순간적인 오염물질 측정농도의 차이와 배경농도에 의한 실측결과 차이가 나타났으나, 전반적으로 CFD simulation 및 실측결과의 유사성이 나타난 점을 미루어 향후 주변농도를 고려한 기여농도를 산출하여 실측농도에 가까운 예측농도 도출이 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 “2014년도 강원대학교 학술연구조정비”로 연구하였음(관리번호-220140040)

#### References

1. Robinson, G., A Tree Dimensional Analytical Model of a Large Tangentially Fired Furnace", J. of the Institute of Energy, Vol. 166, pp. 116~150 (1985)
2. J. O. Yoon, J. J. Sung, Simulations of Wind Environments in the Cities by Computational Fluid Dynamic, Architectural Research Vol. 27, No. 1, pp.213-220(2011)
3. S. M. An, H. Y. Lee, H. H. Sung, Y. J. Choi, A Study on Atmospheric Environment Visualization by Integrating 3D City Model and CFD Model, Korean Society for Geospatial Information System Vol. 19, No. 4, pp. 13-21(2011)
4. J. H. Jo, K. S. Lee, A Study on the Evaluation of Wind Environment and Analytical Method Using CFD Analysis, Architectural Research, Vol. 28, No. 7 pp. 99-106(2012)
5. I. P. Hong, H. S. Ki, Y. Y. Jung, A Study on Inlet Flow Profile in CFD Simulation for Predicting Wind Environment in Urban

- Area, Architectural Research, Vol. 28, No. 1, pp. 311-318(2012)
6. J. H. Han, J. H. Lee, J. O. Yoon, Comparisons the Field Measurement and CFD Simulations of Outside Heat, Wind Environment around High-rise buildings, Architectural Research, Vol. 31, No. 2(2011)
  7. S. J. Jung, A Study on Air Pollution Dispersion around Single Windbreak and Combination of Hill and Windbreak Using CFD Model, Korean Society of Odor research and engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 15-23(2012)
  8. K. S. Kim, K. S. Kim, B. S. Kim, A Study on Odor Dispersion Prediction of Waste Treatment Facilities Using CFD, The Korean Solar Energy Society, pp.342-349(2009)
  9. D. R. Choi, Y. S. Koo, J. S. Choi, The Study of Odor Dispersions using CFD Modeling, Korean Society of Odor research and engineering, Vol. 8, No. 3, pp.118-128(2009)
  10. S. M. Choi, S. K. Kim, D. H. Shin, Cold Flow Simulation of Municipal Waste Incinerators, 25th Symp. Comd (1994)