

태백시 소각로 내 NO_x 제거를 위한 전산유체역학(CFD) simulation 연구

김지현 · 박영구[†]

강원대학교 환경공학과

(2013년 5월 27일 접수; 2013년 6월 28일 수정; 2013년 6월 29일 채택)

Study on Computational Fluid Dynamics(CFD) Simulation for De-NO_x in the incinerator at Taebaek city

Ji-Hyun Kim · Young-Koo Park[†]

Dept. of Environmental Engineering, College of Engineering, Kangwon National University

(Received May 27, 2013 ; Revised June 28, 2013 ; Accepted June 29, 2013)

요약 : 소각로 내 공기 주입은 연소가스의 체류시간, 미연분 제거 및 출구가스 온도 제어 등의 많은 영향을 끼친다. 이에 따라 2차 연소용 공기량을 변화시켜 충분한 체류시간을 확보하고 850 °C 이상의 출구가스 온도를 유지하며, 높은 turbulent를 관리함으로써 안정적인 소각로 운영이 되어야만 한다.

본 연구에서는 현재 운영 중인 소각장의 소각로를 설계하고, 평균 일일 소각량을 바탕으로 1차 공기량을 산정한 후 2차 공기량을 변화하여 CFD 프로그램(Fluent)을 통해 이론적인 공기유동을 규명하였다. 또한 산정된 공기량을 바탕으로 실제 운영 중인 소각장에 적용함으로써 최적의 연소조건을 도출하였다. CFD simulation 결과 1·2차 공기비는 75:25가 최적의 결과로 나타났으며, 2차 공기 분사노즐 전·후면 유속 비는 1:3에서 가장 우수한 결과로 나타났다. 또한, 실제 운영 중인 소각로에 적용한 결과 적절한 소각로 출구온도는 질소산화물 제거 효율 및 일산화탄소 발생농도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Abstract : The feed air to MSW incinerator influences on the residence time of combustion gas, removal of unburnt ash and exiting gas temperature. Thus the secondary air volume could present sufficient residence time which can maintain the exiting temperature over 850 °C. The secondary air also relates directly with the turbulence in the inside of combustion chamber, which finally provide the stable combustion condition.

The present study designed a modern incinerator for a field scale, and evaluation of the potential amount of primary air based on the daily combustible quantity. From the evaluated primary air volume, the secondary air flow rate could be estimated, and its dynamic behavior was verified. In addition, the obtained air volume enables to find an optimum operation condition of the combustion.

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

As a result of the CFD simulation, the air ratio 75 : 25 between primary and secondary air amount was optimum ratio than design criteria 72 : 28. And the flow velocity ratio of front-back of secondary air jet nozzle was found excellent at 1 : 3. In addition, the result of applied to the plant, the removal efficiency of NOx and CO generation would concentration of CO.

Keywords : Incinerator, air flow rate, CFD, removal efficiency, Fluent

1. 서 론

경제 발전으로 개인의 행복지수가 증가함에 따라 대량 소비에 의한 폐기물 발생량도 급격히 증가하고 있으며, 폐기물의 종류 및 성상도 다양해졌다. 폐기물 발생량 증가는 폐기물관리정책 변화에도 큰 변화를 가져왔으며, 1960년대 ‘오물청소법’을 시작으로 최근 2006년에 들어 ‘폐기물 자원화 정책’으로 변화하였다. 폐기물을 단순 오물에서 자원화 개념으로 변화하였으며, 폐기물 관리정책의 변화에 따라 폐기물 처리방법에서도 큰 변화를 나타냈다. 2005년 생활폐기물 매립비중은 27.7 %로 재활용 56.3 %의 약 50 %를 차지하였으나, 2010년에 재활용은 60.5 %로 증가하고 매립은 17.9 %로 감소했다. 또한 폐기물 소각 비중은 2005년 16.0 %에서 2010년 21.6 %로 상당량 증가하였고, 이는 소각이 단순한 폐기물 감량화 뿐만 아니라 자원의 재순환 및 에너지 회수에 대한 비중 또한 커짐을 알 수 있다.

소각에 의한 폐기물 처리는 협소한 국토 면적에 따른 매립지 확보의 어려움을 극복하고, 소각에 의해 발생된 폐열 등을 이용한 에너지 회수의 목적도 있다. 그러나 소각으로 인해 발생하는 유해가스에 의해 지역 주민들과 끊임없는 마찰을 빚게 되고, 이러한 집단 이기주의인 NIMBY현상을 극복하기 위해 폐기물 완전 연소에 따라 배출되는 유해가스를 최소화 시키고, 친환경적인 소각 시설 개발에 많은 연구가 진행되고 있다. 연소 분야에 있어 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 pilot test 또는 plant에서 직접 측정을 보완하는 역할 뿐만 아니라 연소로 설계 및 성능 예측에 이용되고 있다. 이는 난류, 반응, 복사 등에 세부모델로부터 지배방정식을 수치적으로 해석하여 온도 및 유속에 관한 유동장의 전체적인 정보를 제공해 주고 있으나, 해석에 따른 신뢰성에 대한 검증이 전제되어야 한다 [1,2,3]. 이에 따라 소각설비에서 발생하는 유해

가스 제거를 위해 소각로 내부의 완전 연소를 피하고, 연소 제어, 공기주입에 따른 연소가스 영향을 미치는 인자와 공기유동에 관한 연구가 진행되고 있다[4]. 소각로 내 공기 주입은 연소가스의 체류시간, 불완전연소의 제거, 소각로 출구온도 제어 등의 많은 영향을 미친다[5]. 이에 따라 소각로 부하에 따른 제한적인 1차 공기량을 제외한 2차 연소용 공기량을 변화시켜 충분한 체류 시간을 확보하고, 850 °C 이상의 출구 가스온도를 유지하여 지속적인 turbulent 관리로 불완전 연소를 방지해야 한다.

본 연구에서는 운영 중인 T(태백)시 소각장을 대상으로 소각로 내부에서 발생하는 연소공기의 유동현상을 수치해석모델을 적용하여 모사하였으며, 각각의 결과에 따른 세부 사항을 운영 중인 플랜트에 적용할 수 있도록 최적의 운전 조건을 도출하였다.

2. 실 험

2.1. 소각설비 계통도

본 연구는 현재 운영 중인 T시 소각장을 대상으로, 폐기물 처리량은 50 ton/day로 3단형 계단식 화격자 소각로다. 생활폐기물은 폐기물 반입장으로 반입되며, 크레인을 통해 충분한 혼합과 교반을 거쳐 소각로에 투입된다. 고온의 연소가스는 연소가스 냉각설비인 폐열보일러를 거쳐 약 230 °C 이하로 냉각되며, 반건식 반응탑 (Semi Dry Reactor, SDR)을 통해 SOx 및 HCl이 제거된다. 또한, 잔류 유해가스는 활성탄을 이용해 흡착제거하며, 최종적으로 bag filter를 거쳐 분진이 제거된다.

폐기물 소각로 화격자는 고정화격자와 이동화격자로 건조단, 1차 연소단, 2차 연소단, 후 연소단으로 구성되며, 각각 화격자 하부로부터 1차 공기가 공급된다. 1차 공급 공기량은 각 덤퍼를

통해 공급 제어가 가능하며, 1차 공기는 화격자 하부에서 공급되는 상향류, 2차 공급 공기는 양 방향의 엇갈림 노즐로 구성되었다.

Fig. 1은 태백시 소각로의 모형을 나타냈다.

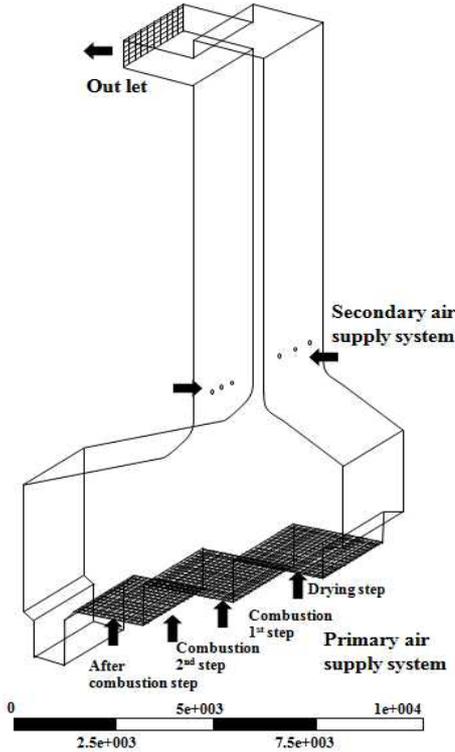


Fig. 1. Schematic of incinerator at Taebaek city.

2.2. 계산방법

1) 공기량 산정

1차 공기량은 평균 운전 data를 통해 산출된 4500 m³/hr로 설정하였으며, Fluent program을 이용한 화격자 상 고형폐기물 모사는 불가능하므로[6], 폐기물 층의 연소현상을 폐기물 층 길이 방향으로 연소율을 가정한 후 열 및 물질정산을 통해 연소가스의 온도를 산출하였다. 1차 공급 공기량은 덤퍼를 통해 각각 화격자에 대한 공급이 제어되며, 소각로 화상 부하면적에 따른 1차 공기량을 산출하였으며, 각 화격자 하부의 압력 sensor에 의한 압력을 고려하여 각각의 화격자 하부로 투입되는 공급량 비율을 산출하였다.

Table 1은 폐기물량에 따른 1차 공기량과 온도 산정 값을 나타냈다.

1차 연소용 공기량은 일일 평균 소각량을 바탕으로 4500 m³/hr로 산정하였으며, 화격자 상단의 폐기물량은 화격자 상부의 폐기물 두께 비에 의해 산정 하였다. 폐기물 발열량은 폐기물 성분 및 원소조성을 이용하여 Dulong식에 의해 산출하였으며, 각 화격자 상부 온도는 두께 비에 의한 폐기물량, 공급공기량, 습공기 비열을 이용하여 산출하였다.

Table 1. Calculation of air quantity and temperature on 1st, 2nd and after-combustion

Items	Waste quantity (kg)	Air quantity (Nm ³)	Temperature (°C)	Temperature (K)	Note
Drying step	65	225	1279	1552	
Combustion 1st step	520	1350	1706	1979	
Combustion 2nd step	455	1350	1493	1766	
After combustion step	260	1575	731	1004	

※ Moisture : 37.58 %, Combustible materials : 53.58 %, Ash : 8.84 %

Drying air specific heat : 0.31 kcal/Nm³.°C
 Water vapor specific heat : 0.35 kcal/Nm³.°C
 Humid air specific heat : 0.33 kcal/Nm³.°C

Equation of Dulong

$$\text{Waste calorie} = 8100C + \left\{ 34000 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) \right\} + 2500S - 600W \quad \text{-----}(1)$$

Calculation of primary feed air temperature

$$\text{Primary feed air temperature} = \frac{\text{Waste calorie} \times \text{Waste quantity}}{\text{Humid air specific heat} \times \text{Air quantity}} \quad \text{-----}(2)$$

2) 배출 가스량 산정

소각로 1차 공급공기 가스조성은 태백시 생활 폐기물 소각장 설계기준의 배출가스 조성을 반영하였으며, 폐기물 조성 및 배출가스 조성은 Table 2와 같다.

Table 2. Composition of combustible material and exhaust gas form solid waste incinerator

Items		Condition
Three components (%)	Moisture	37.58 %
	Combustible material	53.58 %
	Ash	8.84 %
Combustible material element composition (%)	C	31.19 %
	H	3.92 %
	O	16.91 %
	N	1.07 %
	S	0.18 %
	Cl	0.31 %
Exhaust gases composition	N ₂	69.4 %
	O ₂	8 %
	CO ₂	9 %
	H ₂ O	13.5 %
	NO _x	200 ppm
	SO _x	200 ppm
	HCl	300 ppm
CO	50 ppm	

본 연구대상 소각장으로 반입되는 소각물의 경우 국내 여타 소각장과 유사한 삼성분 조성을 가지고 있다. 가연분 원소함량도 탄소 비율이 31.19 %로 가장 높고, 기타 산소와 수소 등 발열량에 영향을 미치는 원소들로 구성되어 있으며,

소각물에 포함되어 있는 불연물 함량은 약 8.84 %인 것으로 나타났다. 한편, 소각로에서 배출되는 가스의 조성은 표에서 볼 수 있듯이 질소산화물과 황산화물이 200 ppm씩 평균적으로 존재하고 있으며, 염화수소가 300 ppm으로 매우 높게 나타났다.

3) 2차 공기량 산정

T시 폐기물 소각장의 1, 2차 공기비는 72:28로 설계되었으며, 2차 공기 분사노즐은 전·후면 각각 3개구, 총 6개의 양방향 엇갈림 노즐로 구성되어 있다. 본 연구에서는 설계기준 외 2가지 조건을 추가하여 3개의 공기비를 산정하였으며, 고정된 2차 공기 분사노즐 전단 댐퍼를 조정하여 전·후면 공급 유량 및 유속을 변화시켜 총 9개의 공기비를 산정하였다.

Table 3은 2차 공기량 변화에 따른 1·2차 공기비와 2차 공기 공급노즐 유속 변화를 나타냈다.

4) 지배방정식

본 연구에서는 SIMPLER method를 적용한 열 유동 화학반응 해석코드 Fluent를 사용하였으며 [7], 격자는 약 66만 개의 비정렬 격자로 구성하였다.

소각설비 연소로 내부는 일반적인 상변화 및 화학반응, 대류 및 복사에 의한 열전달과 층류 및 난류 등의 복합적인 변화를 내포하고 있어 이에 따른 적절한 방정식이 요구된다[8]. 따라서 상변화 및 화학 반응 예측을 위한 함수는 혼합분율/확률밀도 함수 (Mixture Fraction/Probability Density Function, PDF)를 사용하였으며, 유동장 및 온도해석을 위해 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식을 사용하였다.

기존 연구에 의해 사용되어진 방정식을 토대로 각각의 지배방정식은 다음과 같다[9].

Conservation of Mass

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

Conservation of Momentum

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial X_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial X_j} + \rho g_i + F_i \dots\dots\dots (4)$$

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

Conservation of Energy

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial X_i}(k_c \frac{\partial T}{\partial X_i}) + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial X_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial X_i} + Sh \dots\dots\dots (5)$$

Conservation of Species

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial X_i}(J_{i,i}) + S_i \dots\dots\dots (6)$$

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

k-ε Turbulence Model

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial X_j}(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i}) + G_k - \rho \epsilon \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial X_i}(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_i}) + C_1 \frac{\epsilon}{k} Gk - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$Gk = \mu_t (\frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j}) \frac{\partial u_i}{\partial X_i}$$

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

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

Radiation Model (DTRM)

$$\frac{dI}{ds} = -(a_s - a_{abs})I + a_{abs} \frac{\sigma T^4}{\pi} \dots\dots\dots (8)$$

The equation of state

$$\rho = \frac{p}{RT \sum_j^N m_j / M_j} \dots\dots\dots (9)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. CFD simulation 결과

소각로 내 알맞은 공기 주입은 연소가스 체류 시간, 불완전연소 제거, 소각로 출구온도 제어 등의 많은 영향을 미친다. 소각로 부하에 따른 제한적인 1차 공기량을 제외한 2차 연소용 공기량 변화에 따라 충분한 체류시간을 확보하고, 850 ℃ 이상의 출구가스온도를 유지하며, 지속적인

turbulent 관리에 따라 불완전 연소를 방지하여 2차 유해가스 발생을 억제해야 한다.

폐기물 소각량 32 tons/day을 기준으로 1차 공기량 4500 m³/hr로 적용하고, 1,2차 공기비 및 2차 공기 분사노즐 유속을 변화하여 총 9개의 조건을 선정 하였다. 각각의 항목별 CFD simulation 결과는 다음과 같다.

1, 2차 공기비에 따른 온도, turbulent 및 속도의 각 항목별 CFD simulation 결과를 Table 4에

Table 3. Determination of primary and secondary air ratio

Items	Primary air quantity (Nm ³ /hr)	Secondary air quantity (Nm ³ /hr)	Primary and secondary air ratio	Front face nozzle velocity (m/s)	Rear face nozzle velocity (m/s)	Note
Case 1-1	4500	1500	0.75 : 0.25	11.13	11.13	Design basis
Case 1-2				5.57	16.70	
Case 1-3				16.70	5.57	
Case 2-1		1750	0.72 : 0.28	13.0	13.0	
Case 2-2				6.50	19.50	
Case 2-3				19.50	6.50	
Case 3-1		1930	0.70 : 0.30	14.33	14.33	
Case 3-2				7.17	21.49	
Case 3-3				21.49	7.17	

Table 4. Temperature, turbulent and velocity at primary and secondary air ratio

Items	Case 1			Case 2 (Design basis)			Case 3		
	75 : 25			72 : 28			70 : 30		
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
Temperature(K)	1236	1236	1272	1136	1101	1204	1068	1136	1203
Turbulent(m^2/s^2)	0.39	0.59	0.20	0.30	0.48	0.29	0.21	0.26	0.23
Velocity(m/s)	0.49	0.37	0.35	0.57	0.87	0.42	0.94	0.95	0.92

나타냈다.

NOx 분해제거 공정인 SNCR(Selective Non Catalytic Reduction System)은 제거반응 공정 중 반응 온도와 난류혼합이 중요하다. 일반적으로 SNCR 반응 온도는 950 °C 부근에서 가장 우수한 제거효율을 나타내며 동일 온도 시 높은 난류 조건에서 제거효율은 상승된다. 또한 높은 난류는 배출가스 혼합을 촉진하며, 반응 공정에 있어 dead space를 감소시켜 안정된 제거에 기인한다.

Simulation 결과 Case 1는 평균 0.39 m^2/s^2 ,

Case 2는 0.36 m^2/s^2 로 나타났으며, Case 3은 0.23 m^2/s^2 으로 나타났다. 각 공기비 조건별 2차 연소공기 전·후면 노즐 유속비로는 3가지 공기비 조건 모두 1:3 비율이 가장 높게 나타났으며, 총 9개의 조건 중 Case 1-2가 0.59 m^2/s^2 로 가장 높게 나타났다. 따라서, CFD simulation 결과 3개의 공기비 중 온도, 유속 및 난류의 결과를 바탕으로 이론적인 최적 조건은 Case 1(1, 2차 공기비 75:25)로 나타났다. 또한 2차 공기 분사노즐 전·후면 유속 변화

를 고려한 총 9개의 조건 중 Case 1-2가 가장 우수한 결과로 나타났다.

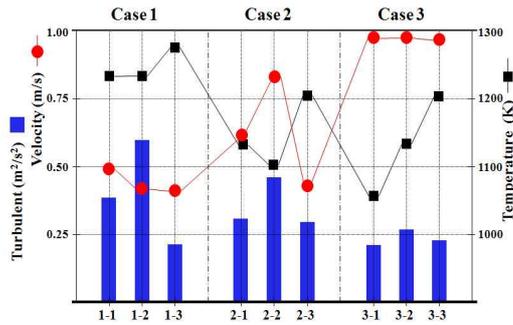


Fig. 2. Variation of temperature, turbulent and velocity at primary and secondary air ratio.

Fig. 3은 Case 1(1:2차 공기비 75:25)의 2차 연소실 내 유속 및 체류시간을 나타냈다. (a)는 평균유속 0.49 m/s, (b)는 0.37 m/s, (c)는 0.35 m/s로 Case 1의 세 가지 조건 중 Case 1-3(c)이 가장 낮게 나타났으며, 평균유속을 바탕으로 체류시간 산출 결과 (a)는 12.84 sec, (b)는 17.01 sec, (c)는 17.98 sec로 나타났다.

Fig. 4는 Case 2(1:2차 공기비 72:28)의 2차

연소실 내 유속 및 체류시간을 나타냈다. (a)는 평균유속 0.57 m/s, (b)는 0.87 m/s, (c)는 0.42 m/s로 Case 2의 세 가지 조건 중 Case 2-3(c)이 가장 낮게 나타났으며, 평균 유속을 바탕으로 체류시간 산출 결과 (a)는 11.04 sec, (b)는 7.23 sec, (c)는 14.98 sec로 나타났다.

Fig. 5는 Case 3(1:2차 공기비 70:30)의 2차 연소실 내 유속 및 체류시간을 나타냈다. (a)는 평균유속 0.94 m/s, (b)는 0.95 m/s, (c)는 0.92 m/s로 세 가지 조건 모두 비슷한 유속으로 나타났으며, 평균 유속을 바탕으로 체류시간 산출 결과 또한 (a)는 6.69 sec, (b)는 6.62 sec, (c)는 6.84 sec로 유사하게 나타났다.

Fig. 6은 Case 1(1:2차 공기비 75:25)의 2차 연소실 내 평균 turbulent를 나타냈다. Case 1의 세 가지조건 중 Figure 6에서 나타내는 바와 같이 Case 1-2(b)가 가장 높은 turbulent를 나타내고 있으며, Case 1-3(c)는 Y축 동일 선상에서 좌측으로 편중됨을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Case 2(1:2차 공기비 72:28)의 2차 연소실 내 평균 turbulent를 나타냈으며, Case 2-2(b)가 Case 2의 세 가지 조건 중 2차 연소실 내에서 가장 높은 분포를 나타내고 있다. Case 2-1은 가장 고른 turbulent 분포를 나타내고 있으나, 낮은 값으로 구성되어 있으며, Case 2-3은 Y축 동일선상에서 우측으로 편중되어 비교적 부

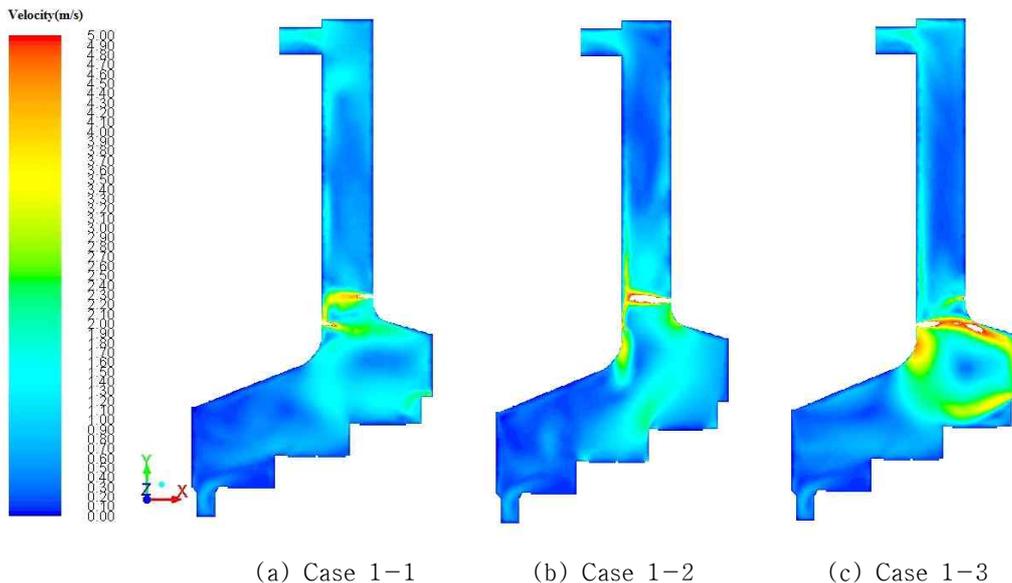


Fig. 3. Contours of air velocity and HRT - Case 1.

적합한 결과로 나타났다.

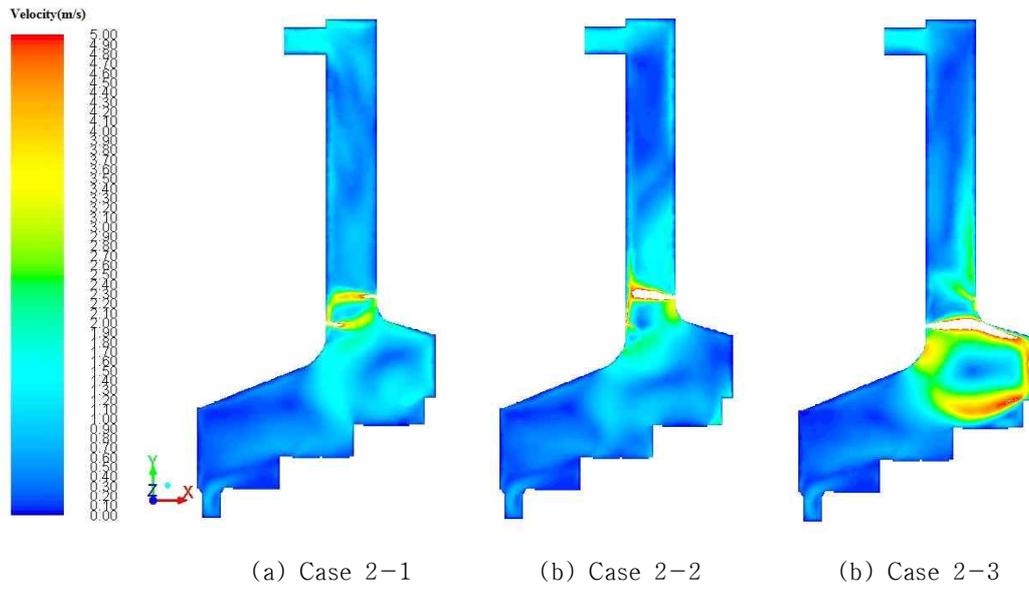


Fig. 4. Contours of air velocity and HRT - Case 2.

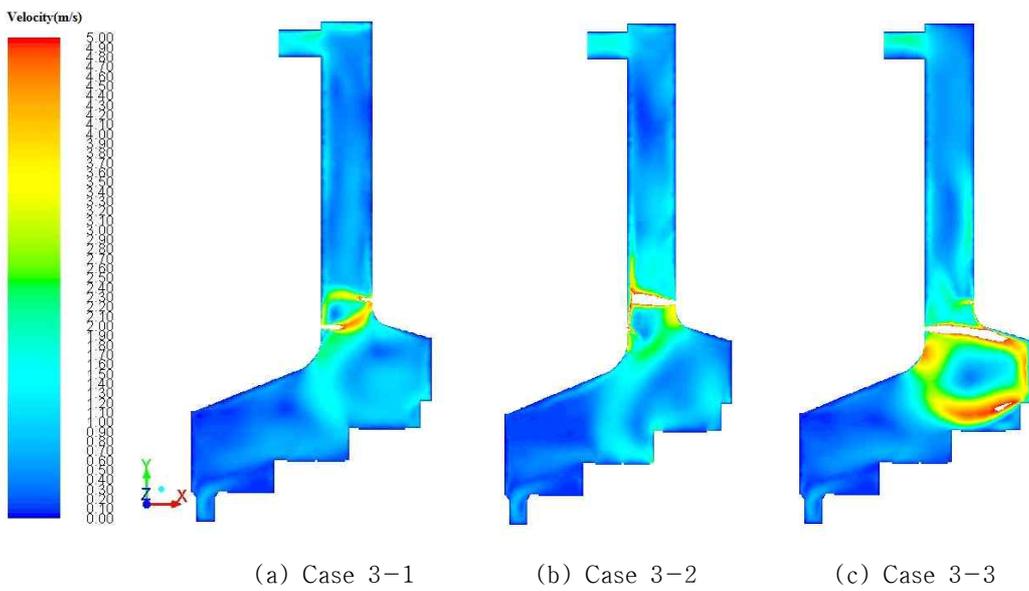


Fig. 5. Contours of air velocity and HRT - Case 3.

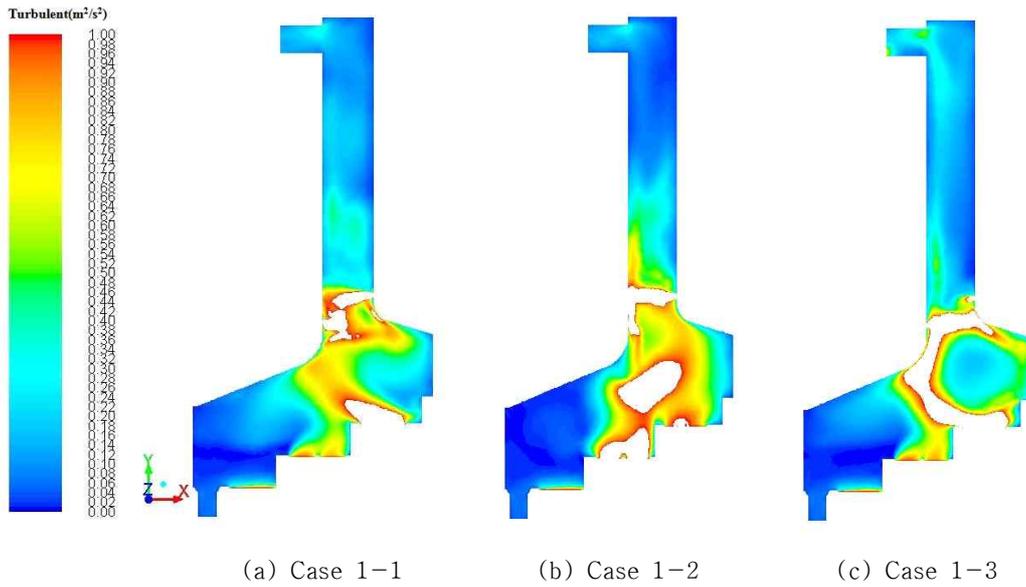


Fig. 6. Contours of turbulent kinetic energy(k) – Case 1.

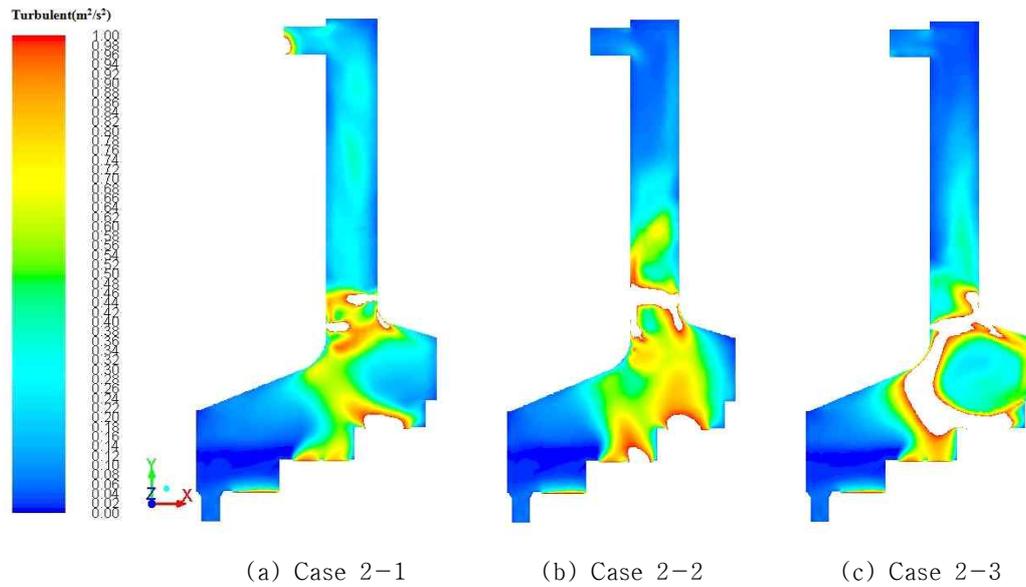


Fig. 7. Contours of turbulent kinetic energy(k) – Case 2.

Fig. 8은 Case 3(1:2차 공기비 70:30)의 2차 연소실 내 평균 turbulent를 나타냈다. 2차 공기량이 증가 할수록 2차 공기 분사노즐 유속 증가

로 인해 2차 연소실 내 turbulent가 증가 될 것으로 예상하였으나, 그와 반대의 결과로 나타났다. Case 3의 세 가지 조건 모두 2차 공기 분사

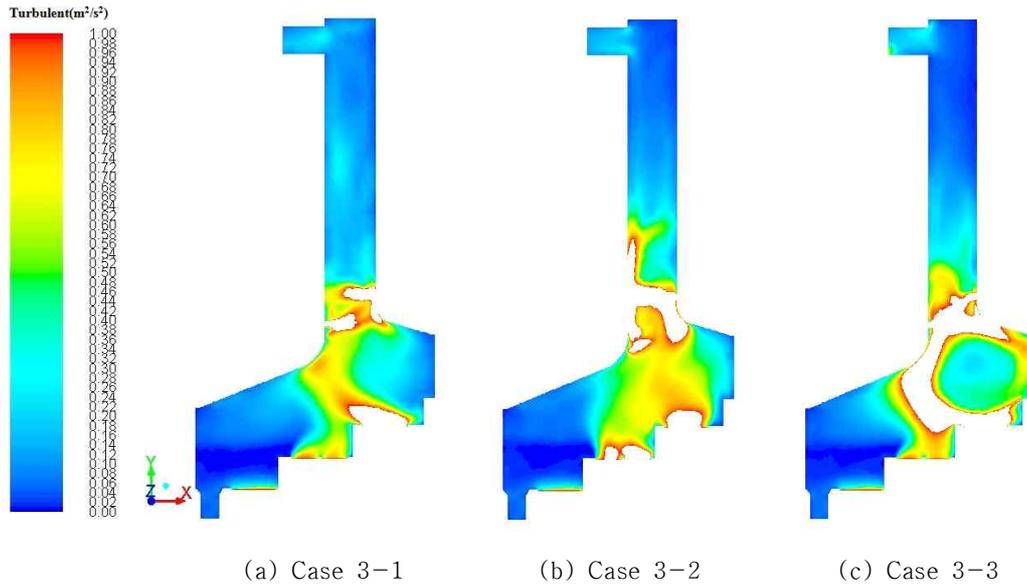


Fig. 8. Contours of turbulent kinetic energy(k) - Case 3.

노즐의 유속이 빠름에 따라 주입구 부근에서는 높은 값을 나타냈으나, 2차 연소실 내부에서는 가장 낮게 나타났다.

3.2. Simulation 결과를 이용한 실 Plant 적용 결과

질소산화물 및 일산화탄소는 2차 연소실 내 온도와 가장 밀접한 관계를 가진다. 일반적으로 연소실 내 온도가 낮을수록 불완전 연소에 의해 일산화탄소 농도는 상승하며 질소산화물 발생량은 감소한다. 반면, 연소실 내 온도가 높을수록 완전 연소에 의해 일산화탄소 농도는 감소하고, 질소산화물 발생량은 증가하게 된다. 또한, SNCR 반응기작에 있어 소각로 내 적절한 온도는 질소산화물 제거효율에 가장 큰 역할을 한다. 따라서 운영중인 plant에 CFD simulation 결과 중 난류, 유속 및 체류시간에서 가장 우수한 결과를 나타낸 Case 1-2(1:2차 공기비=75:25, 전·후면 유속비=1:3)를 적용하여 소각로 출구온도 890 °C ~ 970 °C 사이에서 각각의 온도 장에 따른 일산화탄소 농도, 질소산화물 발생량, 암모니아 slip 및 질소산화물 제거효율을 측정하였다.

운영중인 plant 적용에 있어 1, 2차 공기량은

송풍기 유량변동을 고려하여 시간에 따른 유량 변동량인 ± 3 (%)의 평균 공기량을 적용하였으며, 지속적 폐기물 교반을 통해 균일한 폐기물 혼합을 유지하고, 각 화격자 상단의 폐기물 두께를 측정하여 두께 변화량인 ± 5 (%)를 고려하였다.

실 plant 운전 조건은 다음과 같다.

CFD simulation 결과를 이용한 현장 측정결과는 Table 6와 같다.

질소산화물 측정 결과 제거 효율은 890 °C에서 38.4 %, 910 °C에서 48.5 %, 930 °C에서 53.1 %로 나타났으며, 940 °C에서 69.2 %, 960 °C에서 최대 효율인 73.8 %로 나타났다. 970 °C에서는 960 °C에서 유사한 73.7 %의 제거효율로 나타났으나, 발생농도가 117.0 ppm으로 높아 배출농도 또한 30.8 ppm으로 높게 나타났다.

일산화탄소 측정 결과 소각로 출구온도가 증가할수록 일산화탄소 배출농도는 감소추세로 나타났다. 출구온도 890 °C에서 6.8 ppm의 배출농도로 나타났으며, 910 °C에서 6.0 ppm, 930 °C에서 4.5 ppm으로 점차 감소하였다. 또한, 960 °C에서 3.5 ppm, 970 °C에서 가장 낮은 3.3 ppm으로 나타났다.

Table 5. Waste and Air quantity condition applied to the plant

Items		Waste quantity (kg)	Air quantity (Nm ³)	Note
Primary Air	Drying step	65 (kg) ± 5 (%)	225 ± 3 (%)	
	Combustion 1st step	520 (kg) ± 5 (%)	1,350 ± 3 (%)	
	Combustion 2nd step	455 (kg) ± 5 (%)	1,350 ± 3 (%)	
	After combustion step	260 (kg) ± 5 (%)	1,575 ± 3 (%)	
Secondary Air			1,500 ± 2 (%)	

Table 6. CO concentration, NOx removal efficiency and ammonia slip applied to the plant

Items	Temperature (°C)	CO Conc. (ppm)	NOx inlet (ppm)	NOx outlet (ppm)	Ammonia slip (ppm)	NOx Removal efficiency (%)
Case 1-2	890	6.8	78.6	48.4	27.0	38.4
	900	6.6	78.7	43.1	26.0	45.2
	910	6.0	73.3	37.7	26.0	48.5
	920	5.4	70.2	34.6	26.0	50.7
	930	4.5	77.0	36.1	25.0	53.1
	940	4.0	105.3	32.4	19.0	69.2
	950	3.8	107.0	28.8	18.0	73.1
	960	3.5	106.0	27.8	18.0	73.8
	970	3.3	117.0	30.8	16.5	73.7

Fig. 9는 일산화탄소, 질소산화물 제거효율 및 암모니아 Slip 농도를 도식화 하였다. 일산화탄소 발생농도는 온도 상승에 따라 지속적인 감소로 나타났으며, 질소산화물 제거효율 증가 및 암모니아 Slip 농도 감소는 950°C 이상의 온도에서 안정적인 결과를 나타냈다. 이에 따라, 일산화탄소 배출농도, 질소산화물 제거효율 및 암모니아 Slip 농도를 기준으로 볼 때 안정적인 소각로 출구온도는 960 °C ~ 970 °C로 나타났다.

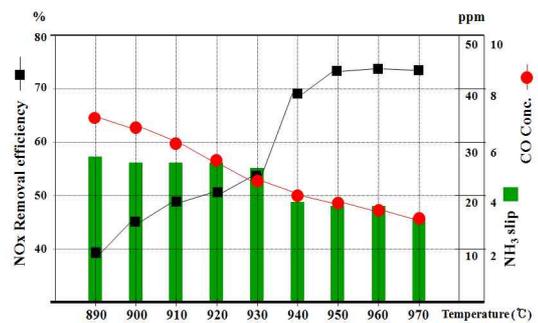


Fig. 9. CO concentration, NOx removal efficiency and ammonia slip applied to the plant

4. 결 론

소각로에서 발생하는 유해가스 발생 억제 및 제거효율 상승을 위해 CFD simulation 연구를 이용한 실 Plant 적용 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

Simulation 결과 소각로 온도, 유속 및 난류 수치결과를 바탕으로 이론적 최적 조건은 1 : 2차 공기비 75 : 25, 2차 공기 분사노즐 전·후면 유속 비는 1:3이 가장 우수하게 나타났다.

Simulation 결과의 최적 조건을 이용한 온도범위 별 실 Plant 적용 결과, 비교적 낮은 온도(930℃ 이하)에서 온도에 의한 질소산화물 발생량은 저하되지만 제거효율이 감소하였으며, 높은 온도(940℃ 이상)에서는 발생량은 비교적 높으나 제거효율 또한 높게 나타났다. 일산화탄소는 낮은 온도에서 미연분에 의한 농도증가를 보였으나, 고온에서 완전연소 됨에 따라 배출농도 감소 현상이 나타났으며, 질소산화물 및 일산화탄소의 온도 의존성을 확인할 수 있었다.

References

1. Santos, A. M, Study of MSW Incinerator Overall operation and on-site measurement over the grate STEV Project Report, Royal Institute Publishing Company, Sweden No. FBT-91/14, (2003)
2. V. Nasserazadeh et al., Three-Dimensional Modeling of The Converyry MSW Incinerator Using Computational Fluid Dynamics And Experiment Date, Trans IChemE (1993)
3. J. Swithenbank et al., Effect of High Speed Secondary Air Jets on the Overall Performance of a Large MSW Incinerator with a Vertial Shaft, Combust. Sci. and Tech, Vol. 92. p. 389~422 (1993)
4. T. Klasen and K. Gorner, Numerical Simulation and Optimisation of a Larg Municipal Solid Waste Incineration Plant, The 2nd Int. Symp. Incineration and Fuel Gas Treatment Technologies (2011)
5. Y. Kori, R. Takeya, Cross Jet Mixing and Its Effects on Combustion Performance in MSW Incinerators with Natural Gas Reburning, The 3rd Int. Symp. Incineration and Fuel Gas Treatment Technologies (1999)
6. V. Nasserazadeh, J. Swithenbank, and B. Jones, Design Opimization of a large municipal Solid Waste Incinerator, Waste Management, Vol.11, p. 249~261 (1991)
7. S. M. Choi, S. K. Kim, D. H. Shin, Cold Flow Simulation of Municipal Waste Incinerators, 25th Symp. Comd (1994)
8. G.Y. Hwang, A Study of Numerical Simulation on Flow Field in the Combustion Chamber of Incinerator According to Air Indection Angles (2004)
9. Robinson, G., A Tree Dimentional Analytical Model of a Large Tangentially Fired Furnace", J. of the Institute of Energy, Vol. 166, p. 116~150 (1985)