

## 화학반응을 고려한 스토커식 소각로의 3차원 모사연구

권순우 · 이종협<sup>†</sup>

서울대학교 화학공학과  
(1997년 7월 28일 접수, 1998년 4월 3일 채택)

### Three-Dimensional Simulation of the Stoker-type Incinerator Considering Chemical Reactions

Soonwoo Kwon and Jongheop Yi<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea  
(Received 28 July 1997; accepted 3 April 1998)

#### 요 약

본 연구에서는 도시 폐기물의 소각을 위하여 사용되고 있는 스토커식 소각로에 대한 삼차원 모델링 연구가 수행되었다. 특히, 소각로내에서의 난류 유동 현상과 혼합 반응을 동시에 고려하여 조업 조건의 변화에 따른 소각로내에서의 유동 현상의 변화와 동시에 CO, NO와 같은 대기오염물질의 배출량을 정량적으로 예측하고, 고체 입자의 궤적 추적을 통하여 체류시간을 예측하였다. 스토커 소각로의 1차 과잉공기를 100%로 일정하게 하고 2차 과잉공기를 0%, 20%, 50%, 100%, 150%로 변화시키면서 연구결과에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과 2차 과잉공기가 100%, 150%로 공급될 때 가장 낮은 농도의 CO와 NO를 방출하지만 이 경우 1,123 K(850 °C) 이상에서의 체류시간이 2초에 미치지 못하여 독성 유기물질인 다이옥신류의 분해가 제대로 일어나지 못할 것으로 예상되었다. 본 연구결과 화학 반응과 체류시간의 예측을 통하여 1차 과잉공기의 양이 100%, 2차 과잉공기의 양이 50%일 경우가 대기 오염물질의 최소 배출을 위한 최적조업조건으로 예상되었다. 또한 화학반응 특성 시간과 난류 혼합특성시간을 비교할 때, 유동에 의한 혼합물이 지배적이지만 전체 과잉공기의 양이 200% 이상이 될 때는 화학반응의 특성시간이 길어져 화학반응을 완전히 무시할 수 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시하는 방법론은 새로운 소각시스템을 설계하거나, 기존의 소각로의 최적 운전조건 탐색에도 유효하게 적용될 수 있을 것이다.

**Abstract**—A three-dimensional simulation study is performed to provide a design basis for maximum performance operation of the stoker-type incinerator. The model equations consider turbulent flows and gaseous chemical reactions to investigate the flow field, the amount of CO and NO emissions and the residence time in the furnace and boiler parts among the incinerator systems. Results show that the concentrations of CO and NO emitted decrease with the increase of the secondary excess air under given conditions. However, the residence times in the temperature zone above 1,123 K(850 °C) are less than 2 seconds, when the primary excess air of 100% is supplied with the secondary excess air of 100% and 150%. Based on the simulation results, the emission of air pollutants would be minimized for the primary excess air of 100% and the secondary air of 50% when considering chemical reactions and residence time in the incinerator. Comparison of characteristic times of the chemical reactions and the turbulent mixing of gases shows that the mixing effect is dominant. However, in the cases of the total excess air of 200% and 250%, the effect of chemical reactions on the incineration efficiency could not be neglected because of the relatively long characteristic time of the combustion reactions. The methodology suggested in the study would be applied to obtain the design parameters of new incinerators and determine the operating ranges of incinerators for the maximum performance.

Key words: Stoker, Incineration, Turbulent Flow, Reaction

#### 1. 서 론

소각법은 다른 폐기물 처리 방법과 비교하여, 가장 다양한 종류의

위험 폐기물을 안전하고, 확실하게 처리할 수 있는 방법 중의 하나로 알려져 있다. 소각법의 장점은 짧은 시간에 폐기물의 양과 독성을 급격히 감소시킬 수 있는 점이다. 또, 위험 물질을 원거리로 수송해야 하는 부담을 감소시킬 수 있도록 이동식이며 소규모로도 제작 및 운전이 가능하며, 폐기물의 부피와 질량을 획기적으로 감소시키

<sup>†</sup>E-mail: jyeceri@plaza.snu.ac.kr

면서 열을 회수하여 공정에 재사용함으로써 운전비용의 부담을 줄일 수 있다. 그러나, 배기가스에는 인체에 유해한 성분들이 다량 포함되어 있어 배출되기 전에 반드시 회수 또는 제거되어야 하며 이를 위해서는 많은 시설과 비용이 드는 단점을 가지고 있다. 소각로 후처리 시설(전기집진기, cyclone, scrubber 등)의 부하(load)를 줄이고 소각로내에서 발생하는 배기가스를 가장 안전하고 경제적인 방법으로 처리하기 위해서는, 연소공정에서부터 환경오염물질들의 발생을 최소로 하는 것이 효과적이다[1]. 소각로내에서 발생하는 대기 오염물질들은 분진입자, Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg 등과 같은 중금속과 PAH (polycyclic aromatic hydrocarbon), PCDD(polychlorinated dibenzo-p-dioxin), PCDF(polychlorinated dibenzofuran) 등의 독성 미세 유기오염물질들이 있고, 불완전 연소 생성물인 일산화탄소(CO)와 연소 반응시 필연적으로 발생하는 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 그리고 HCl, Cl<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 등의 산성화합물이 있다. 소각로내에서 발생하는 이러한 대기 오염물질들은 각각의 물리 화학적 특성에 따라 제어 또는 제거방식이 달라지는데 중금속류의 경우 주로 연소로에 투입되기 전에 분리되는 것이 배출량을 저감하는 가장 좋은 방법 중의 하나이다. 또한, 소각과정에서 발생하는 불완전 생성물인 PAH, PCDD, PCDF, CO 등은 사후처리 방법보다는 소각로내 폐기물의 연소과정에서 공기의 혼합률을 높이고 고온영역에서의 체류시간을 높이는 방법 등으로 제어하는 것이 바람직하다. 그리고, 분진입자나 HCl, SO<sub>2</sub> 등은 cyclone, 전기집진기, wet scrubber 등의 후처리장치로 제거하는 것이 유리하다[1].

폐기물의 소각처리를 위한 소각로는 스토커(stoker)식 연소 방식, 회전상(rotary kiln)식 연소방식, 유동상(fluidized bed) 연소 방식 등이 있는데, 본 연구는 스토커 소각로를 대상시스템으로 하였다.

스토커 소각로는 유동전조, 연소 및 후연소의 연속적인 공정에 의하여 폐기물을 소각시키며 연소된 가스는 소각로의 중간부분에서 공급되는 2차 공기에 의하여 완전연소가 이루어지도록 설계된다. 이러한 스토커식 소각로는 많은 용량을 동시에 처리할 수 있는 장점이 있는 반면 교반력이 약해서 소각 연소로의 설계 및 운전조건에 따라서는 국부과열이나 과도한 재순환영역이 생성되어 대기 오염물질이나 분진 또는 중금속 성분이 대기로 과다하게 유출될 수 있고, 소각로내에서의 체류시간이 충분하지 못하여 불완전 연소가 일어날 가능성이 있다.

따라서, 스토커식 소각로에 대한 연구는 주로 2차 과잉공기의 주입에 따른 소각로내 혼합효과에 관한 연구와 기상 체류시간의 균등화를 위한 소각로내의 형상변경에 대한 연구가 주로 진행되어 왔으며, 실제 크기의 소각로에 대한 실험이 어려워 소각로내 유동 및 온도 분포를 예측하는데 수치해석에 많이 의존하고 있다.

소각로 내부에서 일어나는 유체의 거동현상을 모델화하기 위하여 필요한 지배방정식은 유동 모델로서 난류 모델과 화염생성 모델로 화학반응으로 구분될 수 있다. 이러한 지배방정식은 서로 결합된(coupled) 미분방정식의 형태로 나타나며 그 해석해(analytic solution)를 구하기가 매우 어려워 유한 차분 해석법 또는, 유한요소법을 이용하여 그 해를 구한다[2]. 이러한 수치해석적 방법을 이용한 연구는 주로 소각로내에 존재하는 재순환영역의 예측과 2차 공기의 주입 방식에 따른 혼합률 증진에 그 초점이 맞추어져 왔다. 예를 들어, 상용 유체역학 코드인 FIDAP를 이용하여 2차 공기주입의 효과를 해석하였는데, 2차 공기주입은 1차 연소실 출구부에서 혼합을 증진하는 것을 명확하게 보여주었다[3]. 또한 영국의 Sheffield 소각로에 대한 연구에서, 실제 소각로에 대한 실험과 컴퓨터를 이용한 전산모사를 통해 소각로내에서 고온의 연소가스가 일정한 체류시간을 유지할 수 있도록 여러 가지 장애물(baffle) 설치가 제안되었고, 계산된 형상에 대한 전산모사 결과가 보고되었다[4]. 또한 영국 Conventry MSW 소각로에 대한 전산모사를 통하여 소각로내의 열유동장 및 고

체 입자 궤적을 통한 소각로내 기상의 체류시간을 예측하였으며, CO의 발생량을 예측하였다[5].

스토커식 소각로에 대한 2차 과잉공기 주입 실험을 통해 소각로의 최적 운전 조건을 탐색하는 연구에서는, 2차 과잉공기의 양이 공급된 총 공기량의 40-50%가 될 때 가장 낮은 양의 CO가 발생하는 것이 밝혀져 이 조업 조건이 미국 EPA의 우수 연소방안으로 채택되었다[6]. 또한 캐나다 Quebec시에서는 소각로의 연소실 형상 변경을 시도하였는데 수관아치를 제거하고, 후연소부의 체류시간을 증가시켰으며, 연소공기 주입방식의 개선과 화격자 구동의 자동화 등의 개선을 추가하여 유해 유기물의 방출을 크게 줄이는데 성공하였다. 소각로내 형상변경에 있어서 심한 굴곡을 주어 배기가스가 자연스럽게 배출되지 못할 경우 오히려 연소 과정에 방해가 될 수도 있으나 Quebec시의 소각로의 경우 소각로내 적절한 굴곡을 주어 배기가스가 재순환 영역 없이 충분한 체류시간을 가지면서 배출될 수 있게 하였다.

이 외에도 실험을 통해서나 전산모사를 통해 소각로내 형상을 바꾼 예는 여러 나라에서 볼 수가 있다[7]. 독일의 DBA(Deutsche Babcock Anlagen)의 경우 최근에 역류형이나 중간류형의 연소실을 병류형으로 변경하면 유기물질의 발생이 억제되는 것으로 보고되었다. 덴마크의 Volund는 1차 연소실의 중간에 내화아치(refractory arch)를 설치하여 복사전열의 효과를 주었다. 최근에 일본의 Mitsubishi 중공업은 쓰레기 발열량의 증가에 따른 클랭커 생성과 축적문제를 해결하기 위하여 연소실 후벽의 굴곡을 제거하였으며, Kawasaki 중공업은 혼합을 증진시키기 위하여 역류형을 중간류형으로 변경하였다[7].

스토커식 소각로의 화격자 상단에 배기가스(grate off-gas)에 대한 실험에서는[8] 화학종과 온도 등의 특성을 실험적으로 밝혔으며 배기가스의 각 화학종의 조성과 재(ash)의 분석을 통해 각 화격자별 열 방출속도(heat release rate)를 제시하고 투입되는 폐기물의 조성을 계산하였다. 이 실험에서는 화격자의 각 영역별로 배출되는 가스의 조성을 각각 구하였으며, 미반응 휘발분은 대부분 H<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>임을 밝혔다. 뿐만 아니라, 각 배기가스의 영역별 속도를 측정하여 제시함으로써 소각로 내부에 대한 해석에 많은 도움을 주고 있다.

2차 과잉공기 주입 방식에 따른 소각로내 변화에 대한 연구와는 달리 화격자 하단에서 공급되는 1차 과잉공기에 고농도 산소(부피분율 0.23-0.27)를 주입하여 소각로내의 연소온도가 증가하여 소각로의 용량(capacity)을 증대시킬 수 있다고 보고되었다[9].

이와 같이 현재까지 진행되어온 대부분의 연구에서는 기상의 냉간유동(cold blow) 또는 메탄 등의 완전연소 반응식을 이용한 열간유동 모형만으로 혼합정도를 예측하여, 축소모델 실험과 비교하여 경향적으로 일치하는 결과를 얻었다. 이러한 연구 방법은 기상 혼합률의 증진에 의한 소각로내 오염물질의 저감책을 제시하고자 하였으나, 화학반응식을 무시한 유동장 해석만으로는 혼합률의 증대로 CO나 NO<sub>x</sub> 등과 같은 대기오염물질을 얼마나 저감시킬 수 있는지를 정량적으로 예측하기가 어렵다.

본 연구에서는 유체역학과 소각로내에서의 혼합 반응을 동시에 고려한 분석을 통하여 3차원 스토커식 소각로 모델에서 배출되는 대기오염물질을 최소화하기 위한 최적 조업조건을 제시하고자 하였다. 즉, 본 연구에서는 조업조건의 변화(2차 과잉공기량의 증가)에 따른 CO, NO의 배출량을 정량적으로 예측하고, 고체 입자의 궤적 추적(track)을 통하여 소각로내에서의 국지적인 체류시간을 예측하고자 하였다. 또, 이 과정에서 소각로내에서의 오염물질 저감을 위한 중요한 인자(factor)를 규명하고자 하였다.

## 2. 이 론

### 2-1. 수학적 모델

3차원 스토커 소각로내의 속도장, 열유동장 및 화학종의 발생량을 예측하기 위하여 기상에서의 지배방정식을 질량보존식, 운동량 보존방정식, 엔탈피 보존 방정식을 기초로 하여, 난류에 의한 운동량의 전달과 물질 확산을 고려하였으며 난류모델은 표준 k-ε모델을 사용하였다[10].

체류시간을 예측하기 위한 고체입자 유동방정식은 Lagrangian type model[10, 11]을 이용하였으며, 이 모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

입자의 노내 순간 속도는 평균 속도  $U$ ,  $V$ ,  $W$ 와 난류 교란(turbulent fluctuation)에 의한 속도  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ 의 합으로 표현할 수 있으며,  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ 가 가우스 분포(Gaussian distribution)에 의존할 경우

$$\begin{aligned} u' &= \zeta \langle (u')^2 \rangle^{1/2} \\ v' &= \zeta \langle (v')^2 \rangle^{1/2} \\ w' &= \zeta \langle (w')^2 \rangle^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

로 표현할 수 있고,  $\zeta$ 는 정규 분포 난수(normally distributed random number)를 나타낸다. 식 (1)과 같이 표현된 교란(fluctuation)의 근평균제곱(root mean square)은 난류 에너지(turbulent kinetic energy)  $k$ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$\langle (u')^2 \rangle = \langle (v')^2 \rangle = \langle (w')^2 \rangle = \left( \frac{2k}{3} \right) \quad (2)$$

$\zeta$ 는 난류 소용돌이 지속 시간(characteristic life-time of eddy)  $\tau$ 동안 일정한 값을 가지며 이  $\tau$ 값은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = \frac{C_{\mu}^{3/4}}{\sqrt{2}} \frac{k}{\varepsilon} \quad (3)$$

화학반응식은 9종의 화학종에 대해 9가지 화학반응식을 이용하였으며 사용된 모델식과 반응속도식은 다음과 같다.

화학반응속도식에서 화학종  $i$ 에 대한 속도,  $R_{i,k}$ 를 다음의 아레니우스 반응속도식(Arrhenius reaction rate)으로 표현할 수 있다.

$$R_{i,k} = -v'_{i,k} T^{b_k} A_k \times \prod_{j=\text{reactant}} C_j^{v_{j,k}} \exp(-E_k/RT) \quad (4)$$

식 (4)에서  $v$ 는 양론 계수,  $T$ 는 절대온도,  $A$ 는 아레니우스 상수,  $C$ 는 각 화학종의 농도,  $E$ 는 활성화 에너지를 각각 나타낸다.

난류에서 반응이 일어날 경우 반응속도식에 난류혼합에 의한 영향이 고려되는데, 본 연구에서는 Magnussen과 Hjertager model을 적용하였다[11]. 즉,

$$R_{i,k} = C\rho \frac{\varepsilon}{K} = \sum \frac{m_j}{v_{i,k}} \quad (C; 2 \text{ for products and } 4 \text{ for reactants}) \quad (5)$$

로 쓸 수 있다.

식 (4)를  $A+B+M \rightarrow C+D+M$ 인 반응에 적용하면

$$-r = A_k T^{b_k} \exp(-E/RT) C_A^a C_B^b C_M^c \quad (M: \text{third body}) \quad (4')$$

로 쓸 수 있다. 본 연구에서는 메탄의 연소 반응을 적용하였으며, 본 연구에서 사용된 반응 단계 및 반응 속도 계수가 Table 1에 나타나 있다. Table 1의 R1과 R2는 Westbrook과 Dryer[12]가 제안한 global reaction kinetic이고, R3은 가역반응으로서 역반응 상수는 반응평형 상수( $K_e$ )를 이용해 구하였는데,  $K_e$ 는 다음과 같다.

$$K_e = (R \cdot T)^{-m_2} \exp \left[ \frac{\sum_s v'_s G_s^o - \sum_s v''_s G_s^o}{RT} \right] \quad (6)$$

$$m_2 = \sum_s (v'_{s,s} - v''_{s,k})$$

식 (6)에서  $G_s^o$ 는 반응물과 생성물의 표준 Gibbs 자유 에너지이다. R4와 R5는 Zeldovich NO 발생 속도식[13]을 사용하였다.

## 2-2. 연구 방법

본 연구에서는 도시 고형 폐기물 소각로 모델로서 스토커식 소각로를 선택하였으며 그 형상은 Fig. 1에 나타나 있다[4]. 소각로의 크기는 가로 10.5 m × 높이 20 m × 두께 5 m이며 1차 공기와 메탄은 하단의 계단모양의 화격자를 통하여 각각의 노즐로 예열하여 공급되도록 하였으며, 2차 공기는 소각로의 중간부분에 위치한 노즐을 통

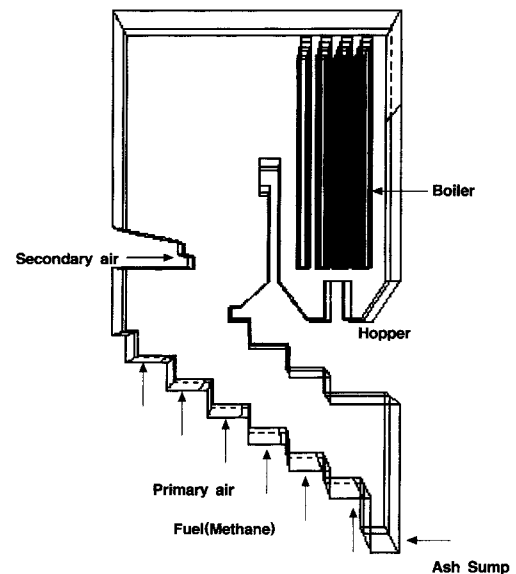


Fig. 1. The geometry of the stoker incinerator.

Table 1. Reaction kinetics(forward reaction)

No.	Reaction <sup>(1)</sup>	A	$\beta$	E[J/kgmol]	a	b	c	Note <sup>(2)</sup>
R1	$\text{CH}_4 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	2.8E09	0	2.03E08	-0.3	1.3	0	irrev.
R2	$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2.3E12	0	1.65E08	1	0.25	0.5	rev.
R3	$\text{O} + \text{O} \rightleftharpoons \text{O}_2$	5.0E09	-0.25	0	2	0	0	rev.
R4	$\text{O} + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{N}$	7.6E10	0	3.2E8	1	1	0	rev.
R5	$\text{N} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{O}$	6.4E06	1	2.6E08	1	1	0	rev.

(1)  $A+B+M \rightarrow C+D+M$

$-r = A_k T^{b_k} \exp(-E/RT) C_A^a C_B^b C_M^c$  (M: third body)

(2) irrev.: irreversible reaction

rev.: reversible reaction

하여 상온으로 주입되도록 하였다. 본 연구에서는 소각 과정에서 발생하는 기체성분인 일산화탄소, 이산화탄소, NO 등의 생성 및 소멸 반응을 고려한 소각로의 내부 유동 현상과 오염물질의 발생량을 정량적으로 예측하기 위하여 반응 단계와 반응속도식이 잘 밝혀져 있는 메탄의 연소를 그 대상으로 선정하였다.

소각로의 후류 부분인 우측 상단에는 폐열 회수 보일러가 위치하고 있으며, 그 크기는 가로 0.625m×높이 8.5m×두께 1m의 덕트(duct)형태로 12개의 수관으로 이루어져 있으며, 연소 가스의 출구는 보일러 후면에 위치하며 그 크기는 가로 5m×세로 3m이다.

또, 실제의 소각로와 유사하게 모델링을 하기 위하여 1차 과잉공기는 예열하여 주입하였으며, 2차 과잉공기는 상온으로 주입하였다. 소각로 내벽은 모두 단열이며 열교환은 후류의 보일러 수관에서만 일어나는 것을 가정하기 위하여 보일러 수관인 외벽은 등온으로 가정하였다.

도시 고형 폐기물 소각로내에서 일어나는 열유동 현상을 실제와 같이 모사하기 위해서는 폐기물 고형층내에서의 열 전달 및 물질 전달, 그리고 화적자 운동에 의한 폐기물의 이동 및 고형층과 배기 가스 사이의 복사열전달 등을 고려하여야 하는 등 매우 복잡하며 해석해뿐만 아니라 수치해를 구하는데도 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 2차 공기 주입에 따른 대기 오염 물질 배출량 변화를 파악하여 소각로 운전의 최적 조업조건을 탐색하는 것을 연구의 목적으로 하여 소각대상 모델 물질로 연소 메카니즘이 잘 알려진 CH<sub>4</sub> 가스를 이용하여 연소과정을 단순화하는 대신, 소각로내의 유동장과 온도장을 예측하고 2차 과잉공기 주입량에 따른 CO 및 NO 등의 대기오염물질의 배출 가능성과 제어 가능성을 예측하는 방법론에 연구의 초점을 두었다.

메탄(CH<sub>4</sub>)은 각 화적자 하단에서 0.4m 폭의 노즐로 일정하게 수직 분사되고, 1차 공기는 메탄 주입 노즐 옆에 위치하여 0.8m 폭의 노즐로 주입되었다. 그리고 메탄과 1차 공기의 주입 온도는 600K로 가정하였는데 이 온도는 실제 소각로에서 폐기물 상단에서 불꽃이 형성되는 것과 폐기물 아래쪽에서 공급되는 1차 공기가 예열된다는 조건과 유사하게 하기 위하여 가정한 온도이다. 메탄의 주입량은 600K에서 2.26 m<sup>3</sup>/sec로 하였고, 1차 공기 분사 속도는 메탄의 몰수에 대해 양론적으로 계산하여 결정하였으며, 2차 공기는 좌우 양쪽의 노즐에서 동일한 속도와 온도로 수평으로 소각로내에 주입되도록 하였다. 2차 공기의 주입 온도는 상온 300K로 가정하였다. 모든 inlet은 난류로 난류 강도(turbulent intensity)는 10%, 특성 길이(characteristic length)는 각 inlet의 폭을 적용하였다[10]. 따라서 메탄 주입 특성 길이는 0.4m, 1차 공기주입 특성 길이는 0.8m, 2차 공기 주입 특성 길이는 0.5m이다.

소각로 내벽은 단열 조건으로 가정하였으며, 보일러의 외벽은 등온 426K로 가정하였는데 이 온도는 평균 1,273K의 연소가스가 지나갈 때 보일러 내벽으로는 373K(100°C)의 수증기가 항상 접촉하는 상황을 가정하여 계산된 값이다.

특정 온도내에서 기체의 체류 시간 예측을 위하여 소각로내에서의 고체 입자 궤적을 추적하였다. 본 연구에서는 지름 5μm의 고체 입자[4] 10개씩을 6개의 화적자마다 연료 또는 1차 공기와 함께 투입될 경우 입자들의 체류시간과 고체입자가 지나는 온도를 추적하였다. 고체입자가 소각로내의 온도 영역을 지날 때, 고체입자가 주변의 유체 온도와 평형 상태를 유지하도록 하기 위하여 입자의 열용량은 10<sup>-3</sup> W/m<sup>2</sup>·K로 가정하였으며, 투입위치는 후류에서 보일러에 부딪히는 것을 방지하기 위하여 두께방향 1.5m 지점인 위치로 하였다. 그리고, 실제 고형폐기물 소각시 발생하는 검댕(soot)이나 고형 입자와 유사하게 하기 위하여 초기에 정지된 상태에서 1차 공기와 연료의 연소에 의해 소각로 내부로 투입되도록 하였다.

Table 2. Characteristics of cases

Air	Total excess air (%)	Primary excess air (%)	Secondary excess air (%)	Secondary excess air Total air (%)
CASES				
CASE 1	100	100	0	0
CASE 2	120	100	20	9.09
CASE 3	150	100	50	20.00
CASE 4	200	100	100	33.33
CASE 5	250	100	150	42.86

본 연구에서는 1차 과잉공기의 양을 100%로 일정하게 유지하고, 2차 과잉공기의 양을 0%에서 150%로 증가시키면서 모델링을 실행하였다. 그 각각의 주입된 전체 공기량에 대한 2차 과잉공기의 분율을 Table 2에 나타내었다.

본 연구의 대상인 3차원 스토커 소각로내의 연소반응에서 소각시스템에 대한 난류유동 및 화학반응에 대한 해석적인 해를 얻기는 대단히 어려워 상업용 유체역학 코드인 Fluent V4.2를 사용하였다.

본 연구에서는 스토커식 소각로를 preBFC V4.2를 이용하여 X방향, Y방향, Z방향으로 30×40×11=13,200개의 격자로 구성하였다. 모든 연구대상에 대하여 SIMPLEC(SemiImplicit Method for Pressure-Linked Equation-Consistent) 알고리즘을 이용하였으며 계산을 위하여 HP735/125 기종을 사용하였다.

수렴 척도(convergence criteria)는 모든 나머지(residuals)의 합이 10<sup>-3</sup> 이하로 하고, 엔탈피 나머지는 10<sup>-5</sup> 이하로 하였다. 그러나, 본 연구에서 이용한 Fluent는 범용 유체역학 코드인 이유로, 본 시스템과 같은 복잡한 화학반응에 대해서 그 나머지(residual)가 더 이상 감소하지 않는 경우가 있으며, 특히 NO의 생성 반응의 경우 네 가지 반응이 관여하여 완전히 수렴시키기 위해서는 너무나 많은 시간이 소요된다. 따라서, 본 시스템에서의 수렴조건을 엔탈피의 나머지가 10<sup>-6</sup> 이하로 하고 CO의 경우 2×10<sup>-4</sup>로 하였으며 NO의 경우 수렴에 상당한 어려움이 있어 그 나머지 값이 10<sup>-2</sup> 이하로 동일하게 하였다. 수렴시간은 과잉공기의 양이 적을수록 3000분 이상의 CPU time이 필요하였고 과잉공기의 양이 많을수록 수렴속도는 빨랐다. 반응식이 복잡할 경우 수렴될 때 나머지의 값이 계속해서 교란(fluctuation)되는 현상이 나타났는데, 이를 조정하기 위하여 수렴되는 동안 sweep number와 underrelaxation factor를 연속적으로 조정하여 결과를 얻었다. 이때 sweep number값은 30-70정도로 유지하였다.

### 2.3. 연구결과

본 연구에서는 스토커식 소각로에 대한 3차원 모델링을 수행하여 2차 과잉공기의 주입량을 변화시키면서 각각의 경우에 대해 난류 반응 모델을 적용하여 열유동장과 그에 따른 CO, NO의 발생량을 정량적으로 예측하였으며 고체입자의 궤적을 통해 소각로내 유체의 특정 온도 영역에서의 체류시간을 예측하였다.

소각로내에서 2차 과잉공기와 1차 과잉공기의 공급비율에 따라 오염 물질의 배출량을 제어할 수가 있는데, 특히 2차 공기가 총 공기량의 40-50%일 때 CO의 방출량이 매우 낮고, 화염 높이가 낮아진다[6]. 이것은 미반응 휘발분이나 CO가 2차 공기에 의해 다시 연소되어 CO<sub>2</sub>로 산화되기 때문이다. 또, NO의 발생량을 제어하기 위해서 연소시 불꽃의 온도를 낮추거나, 산소 과잉 포켓을 방지하는 방법을 이용하는데, 소각로내에서 NO제어를 가능하게 하는 것이 바로 2차 공기이다. 2차 공기는 소각로 후류에 산소를 공급하면서 온도를 낮추는 역할을 한다[14]. 2차 공기의 양이 적으면 온도가 증가하여 NO가 발생하는 반면, 2차 공기의 양이 많으면 온도는 낮아지나 후류의 고온 영역에 산소를 공급하게 되어 국지적으로 산소 과잉 포켓

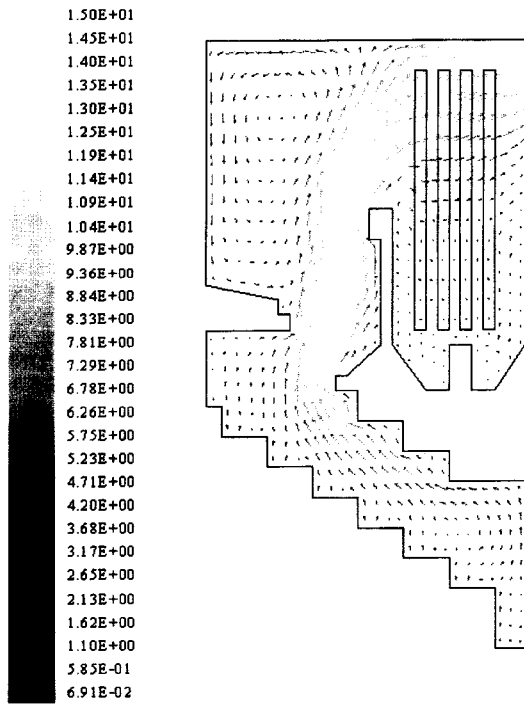


Fig. 2. Vector velocity component for the CASE 1.  
-unit : m/sec

이 발생하여 NO의 양은 오히려 증가한다. 따라서, 같은 양의 폐기물을 소각하는데도 낮은 NO 생성을 위하여 최적의 2차 공기량과 1차 공기와의 비율이 존재한다는 것을 의미한다.

#### 2-3-1. 속도장

본 연구의 결과, Table 2에 나타난 연구 대상 모든 경우에 대하여 Fig. 2와 같이 소각로내 좌측 상단에 커다란 재순환영역이 존재하였다. 이 영역은 소각로의 소각에 필요한 유효 체적을 줄이며 소각로의 체적/주입 연료와 공기의 속도×단면적의 값이 평균 체류 시간과 일치하지 않는 가장 큰 원인이 되고 있다. 본 연구결과, Table 2에 나타난 모든 연구 조건에서 재순환영역이 존재하며 단순히 2차 과잉공기의 양을 증가시켜서는 재순환영역을 줄일 수가 없다. 이 영역을 줄일 수 있는 방법은 소각로의 형상을 바꾸어 유동장 자체를 개선하거나 2차 공기를 강력한 제트류로 공급하는 방법 등이 있다[3,5,15].

2차 공기량의 증가(2차 공기 주입 속도의 증가)에 의한 유동의 변화가 예상되었으나, 결과에 의하면 2차 과잉공기가 150% 주입된 CASE 5의 경우에도 최고 속도가 14.5 m/sec에서 18.1 m/sec로 증가한 것 외에는 유동장이 크게 개선되지 않았다. 따라서 본 연구에서 주입한 2차 공기는 소각로내 유동을 바꾸기보다는 오히려 후류의 온도를 낮추고 산소를 공급하는 역할이 더 주요한 것으로 보인다. 각 경우에 대하여 최고속도를 비교해 보면, CASE 1부터 CASE 5까지 14.6 m/sec, 15.4 m/sec, 16.2 m/sec, 17.4 m/sec, 18.2 m/sec로 점차 그 값이 커지는데, 이 최고 속도는 주입되는 전체 공기의 양이 늘어날수록 증가함을 알 수 있다.

보일러 부분에서는 연소가스의 유동이 보일러 수관에 의해 크게 영향을 받지 못하고 있으며, 특히 보일러의 하단까지 연소가스가 거처 가지 못하고 있다. 이것은 보일러 사이가 1m 정도로 넓어서 유동에 커다란 영향을 미치지 못하며 유동을 하단까지 유도하지 못하는 것으로 보인다. 따라서, 보일러의 열효율을 높이는 방법으로는 보일러의 수를 증가시키는 방법과 보일러 수관의 간격을 좁히는 방법이 있을 것이다.

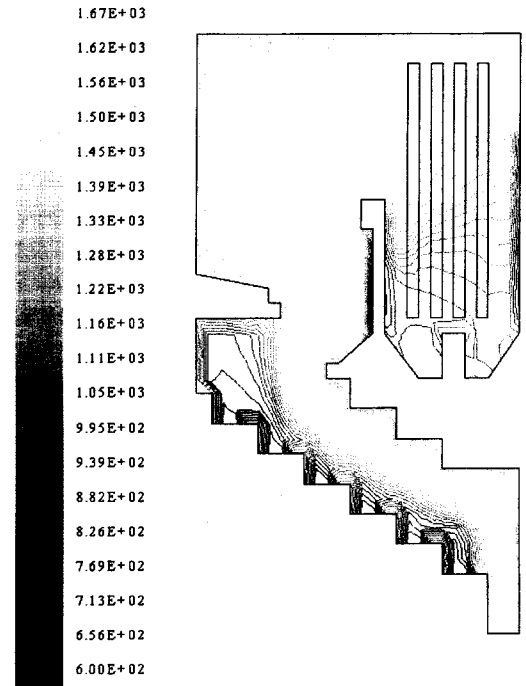


Fig. 3. Contour plot of predicted temperatures for the CASE 1.  
-unit : K

#### 2-3-2. 온도 분포

소각로내에서의 온도분포를 조사한 결과, 본 연구 조건에서는 1차 과잉공기의 양을 일정하게 유지하고 2차 과잉공기의 주입량을 증가시킬수록 소각로 상단의 온도가 감소하였다. 이것은 2차 과잉공기의 영향으로, Table 2의 CASE 1과 CASE 5를 비교하며 보면 상단의 온도가 각각 1,450 K와 1,173 K로 큰 차이를 보이고 있다. Fig. 3과 4에 CASE 1과 CASE 5의 소각로내 온도분포를 나타내었다. 공기가 주

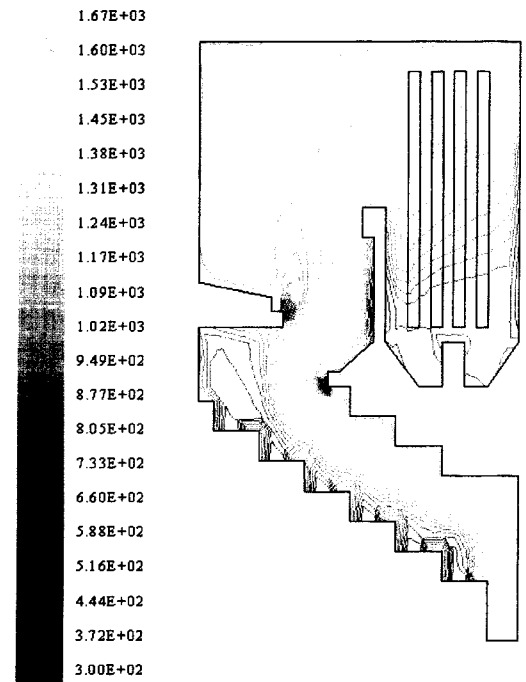


Fig. 4. Contour plot of predicted temperatures for the CASE 5.  
-unit : K

입되지 않는 재웅덩이(ash sump) 주위에는 온도 상승이 일어나 모든 연구조건에서 최고 온도(peak temperature)를 나타내고 있다. CASE 1의 경우 2차 공기가 존재하지 않으므로 소각로 상단의 온도분포는 별다른 교란 현상이 없이 소각로를 빠져나간다. Fig. 3에서는 관찰할 수 없었던 2차 공기 주입에 의한 온도혼합이 Fig. 4에서 나타났으며, 2차 과잉공기가 150% 주입되면서 산소의 후류 공급이 원활하여 1,500 K 이상으로 가열된 배기가스가 1,200 K 정도로 온도가 떨어져 출구로 빠져나간다. 2차 공기의 주입량이 늘어날수록 2차 공기 노즐 하단과 상단의 온도차이가 심하게 나타나는데 이것은 상온(300 K)의 2차 공기가 수평으로 공급되어 열혼합이 증대되는 것으로 보인다. 특히 2차 공기가 150% 주입되는 CASE 5의 경우 노즐 부근에서 온도장이 2차 공기의 영향을 가장 크게 받고 있음을 알 수가 있다. 출구를 빠져나가는 배기 가스의 평균온도 역시 주입되는 2차 과잉공기의 양이 늘어날수록, 1,372 K, 1,345 K, 1,266 K, 1,186 K, 1,143 K로 점차 감소한다.

본 연구결과 2차 공기의 양이 증가하여도 소각로내에서 최고 온도는 모두 1,670 K 정도로 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. 이것은 최고 온도가 모두 산소가 원활히 공급되지 않는 소각로 하단 재웅덩이에서 나타나기 때문이고 이 부분은 2차 과잉공기의 영향이 전혀 없음을 알 수 있다. 소각로내 온도장 분포 분석 결과, 전체 과잉공기의 양을 증가시킬수록 소각로내 후류의 온도는 낮아지고, 앞에서 살펴본 대로 상대적으로 유동장에는 큰 영향을 끼치지 못한다. 그러나, 온도분포에는 상당한 영향을 끼쳐 소각로 하단온도 1,600 K, 상단온도가 1,100 K로 소각로내 온도편차가 약 500 K에 이른다.

### 2-3-3. CO의 농도 분포

소각로내에서 발생하는 CO의 양을 정량적으로 예측하는 것은 CO의 발생량을 줄이는데 유용할 뿐만 아니라, 대표적인 독성 유기 물질인 다이옥신류를 줄이기 위해서는 소각로내에서 산소 과잉 상태를 유지하며 휘발분이 국지적인 과잉상태가 되지 않도록 연료와 공기의 혼합물을 최대로 유지하는데 필요한 정보를 제공한다. 그러나, 이 혼합정도를 직접 평가하는 척도가 없어 그 대리물(surrogate)의 농도를 측정하는 간접적인 방식을 이용하는데, 후류의 CO나 O<sub>2</sub>의 배출량을 측정하여 혼합정도를 예측하며 같은 공기량에 대해 불완전 혼합에 의한 CO의 발생이 최소가 되게 조업을 한다[1].

연구대상의 모든 경우에 대하여 소각로내에서 발생하는 일산화탄소의 농도분포는 소각로내 온도분포와 거의 유사하였다. CASE 1의 경우 일산화탄소는 산소가 결핍된 부분(재웅덩이 부근)에서 최대로 발생하여 출구로 빠져나가고, 재순환영역이 발생한 좌측상단에서 기상의 체류시간이 높아 CO가 CO<sub>2</sub>로 전환된다. 2차 과잉공기가 100% 주입되는 CASE 4의 경우는 2차 과잉공기 노즐부근에서 교란현상이 나타나고 후류로 갈수록 CO의 농도는 17,000 ppm에서 3,000 ppm으로 줄어들었으며 이 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 2차 과잉공기가 150% 주입되는 CASE 5는 후류의 CO 농도가 2,000 ppm 정도로 낮아진다. 즉, 2차 공기의 주입량이 늘어날수록 소각로를 빠져나가는 일산화탄소의 양이 감소하였다. 이것은 2차 공기가 공급되면서 CO가 CO<sub>2</sub>로 전환되는 반응이 지배적으로 일어나며, 소각로 하단에서 발생한 일산화탄소가 2차 공기 중의 높은 산소 농도에 의해 이산화탄소로 전환되는 반응 때문인 것으로 보인다.

Table 2에 나타난 본 연구의 각 경우에 대하여 발생되는 CO의 농도를 비교하면 산소 결핍에 의하여 연소 온도가 가장 높을수록 CO의 농도가 증가하고(예; 재웅덩이), 발생한 CO가 2차 공기에 의해 CO<sub>2</sub>로 전환되는 과정을 거친다. 특히 소각로 좌측 상단에 존재하는 재순환영역에서는 체류시간의 증가로 인하여 CO의 농도가 감소하고 있다. 따라서, 메탄의 연소반응에 의하여 생성되는 CO는 고온 영역에서 산소가 결핍될 경우 최대로 발생하며 산소의 공급이 원활하고

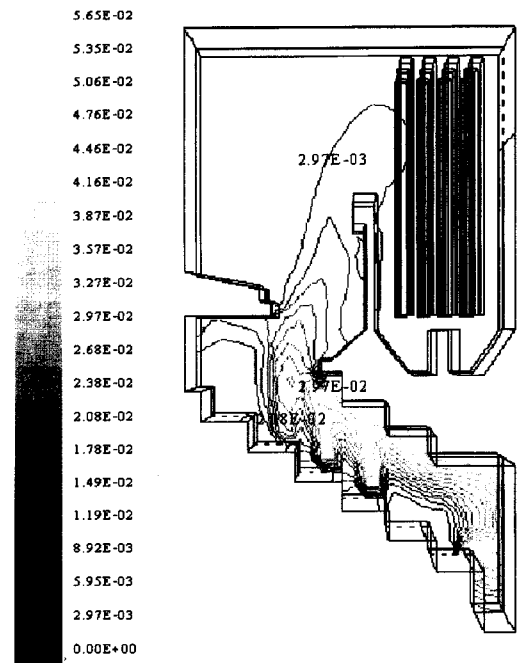


Fig. 5. Contour plot of predicted CO mole fraction for the CASE 4.  
-unit : dimensionless

산소와의 반응시간 즉, 체류시간이 커질수록 그 발생량은 줄어든다.

### 2-3-4. NO의 농도 분포

질소산화물의 발생은 온도가 높을수록, 체류시간이 커질수록, 산소 과잉 포켓이 증가할수록 그 발생량이 커지는 것으로 알려져 있다 [13, 14, 16]. 본 연구결과 가장 높은 온도를 보인 CASE 1의 경우에 최대온도 부분인 재순환영역과 재웅덩이 부근에서는 발생하는 NO의 양이 다른 영역과 거의 차이를 보이지 않다가 체류시간이 긴 보일러 하단에서 가장 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 이것은 보일러 하단으로 배기가스가 거쳐 나가지 못하면서 정체되어 그 긴 체류시간에 의하여 Table 1의 반응식 중 산소라디칼(O·)과 질소라디칼(N·)이 많이 발생하기 때문인 것으로 보인다.

또, CASE 2에서는 NO가 발생하는 영역은 변화가 없으나 소각로 상단에서의 발생량 자체가 1,400 ppm에서 448 ppm으로 감소하였다. 2차 과잉공기가 50% 공급된 CASE 3의 경우 발생량이 10 ppm 정도로 발생량이 감소하였고 재순환영역에서 높은 체류시간에 의해 다른 영역보다 약 4배정도 많은 양의 NO가 발생하였으며, 이런 현상은 2차 공기의 주입으로 인해 과잉 공급된 산소가 긴 체류시간을 가지면서 이 고온의 영역에서 산소(O<sub>2</sub>)가 산소라디칼(O·)로 분해되어 질소(N<sub>2</sub>)와 결합하는 반응을 거쳐 NO를 발생시키기 때문이다. 과잉 산소의 공급량이 100%, 150%로 증가하는 CASE 4, CASE 5는 재순환영역에서 NO의 발생이 성층화된다. CASE 4의 경우 소각로내에서 발생하는 NO의 양을 Fig. 6에 나타내었다. 그러나 소각로내의 온도가 낮아지기 때문에 NO의 발생량은 점차 떨어진다.

따라서, NO의 발생은 산소가 과잉으로 존재하는 경우 고온에서 체류시간이 큰 곳에서는 많은 양의 NO가 발생하지만 체류시간이 짧은 영역이나 2차 공기에 의해 온도가 낮아지는 영역에서는 비록 산소의 양이 과잉으로 존재하더라도 NO로 전환되지 못하고 소각로를 빠져나감을 알 수 있다.

### 2-3-5. 난류 에너지와 소산 속도

식 (19)에서 나타난 것과 같이 소용돌이 지속시간은 난류에너지와 소산속도로 계산할 수가 있다. 이렇게 정의한 소용돌이 지속시간은 소각로내에서 반응속도와 유동의 혼합 속도를 비교하는 하나의 척

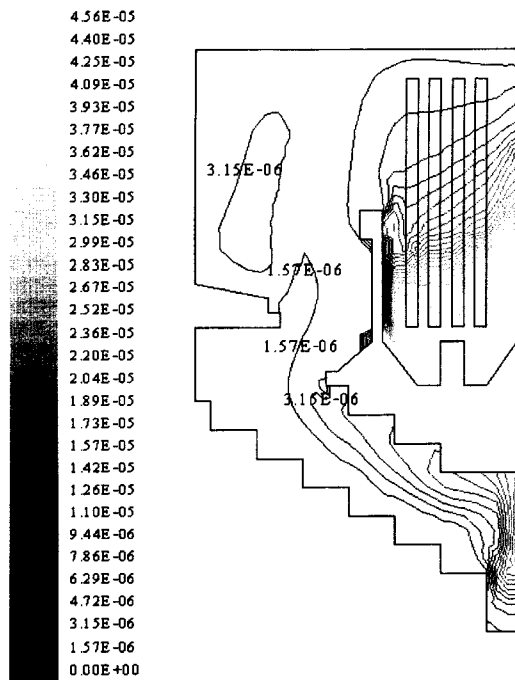


Fig. 6. Contour plot of predicted NO mole fraction for the CASE 4.  
-unit : dimensionless

도가 될 수 있는데, 예를 들어 소각로내에서 소용돌이 지속시간이 반응속도보다 더 긴 경우 유체의 혼합속도를 전체 난류 반응의 속도 결정단계로 가정할 수 있어 유동장의 개선으로 혼합률을 증가시킬 수가 있다.

CASE 1에서의 난류 에너지 생성은 Fig. 7에서와 같이 소각로 상단 불꽃이 형성되고 속도가 빠른 부분과 보일러를 만나는 곳에서 높

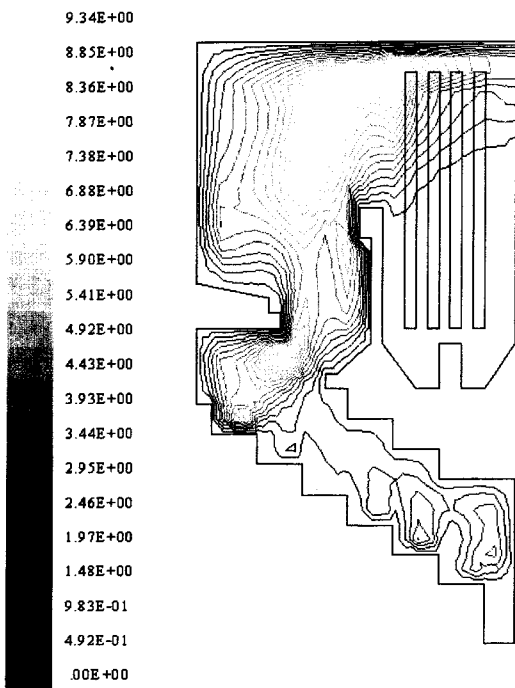


Fig. 7. Contour plot of predicted kinetic energy of turbulence for the CASE 1.  
-unit :  $m^2/sec^2$

Table 3. Eddy characteristic life-time at the average kinetic energy of turbulence

CASES	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
Avg. $k$ ( $m^2/sec^2$ )	2.09	2.01	2.04	2.00	2.08
Avg. $\epsilon$ ( $m^2/sec^3$ )	2.51	2.65	2.77	2.87	3.09
Eddy life-time(sec)	0.0967	0.0881	0.0856	0.0810	0.0782

은 값을 보인다. 소산속도는 난류 에너지 생성과 거의 같은 부분에서 최대값을 보인다. 즉, 난류 소용돌이(turbulence eddy)가 가장 많이 형성되는 곳에서 소산속도가 가장 빠름을 알 수 있다. CASE 2의 경우, CASE 1에 비해 난류에너지 생성은 약간 감소하고 소산속도는 증가한다. 2차 공기의 주입량이 늘어갈수록 2차 공기 주입 노즐 부근이 높은 난류 에너지를 보이는 경향은 일정하고 소산속도의 경우 2차 공기의 주입량이 늘어날수록 점차 증가하여 CASE 5의 경우에는  $20.2 m^2/sec^3$ 의 최대값을 보인다. 이는 소각로 하단에서 올라오는 고온의 연소 가스와 상온(300 K)의 2차 공기가 빠른 속도로 혼합되면서 화학 반응이 일어나기 때문임을 알 수 있다.

보일러 수관과 만나는 곳에서 난류 에너지가 최대를 보이는 것은 최대속도를 가진 유체가 보일러 벽면에 부딪치면서 교란되는 것으로 예상되는데, 모든 경우에 대해 보일러 수관 주위를 지나는 속도가  $14 m/sec$  이상이었어서 보일러 수관과 만나는 부분에서 최대의 난류 에너지를 보이고 있다.

식 (19)에서 제시한 난류 소용돌이 지속시간을 각 CASE별로 난류 에너지와 소산 속도를 격자상에서  $k=4$  평면에서 평균하여 구하여 보면 Table 3과 같다.

Table 3에서 보듯이 난류 에너지의 평균값은 크게 증가하지 않으나, 평균 소산속도가 증가하여 소용돌이 지속시간은 점차 짧아지는 것을 알 수가 있고, 이를 혼합 속도라 생각하면 2차 공기의 양이 증가할수록 혼합이 촉진됨을 알 수 있다. 또한, 2차 과잉공기가 증가할수록 CO의 양도 점차 감소하므로 소용돌이 지속시간과 비교하였을 때 CASE 5의 경우가 기상혼합이 가장 잘 일어남을 알 수 있다.

#### 2-3-6. 체류시간의 예측

소각로내에서의 NO발생이나 독성 유기물질(PCB, PCDD, PCDF 등)의 발생에 관여하는 인자는 공기혼합률, 온도, 산소의 양, 그리고 체류시간 등이 있다. 이 중에서 실제 공정의 기상 체류시간은 전체 소각로내 부피를 연료와 공기의 주입량으로 나눈 평균 체류시간과 편차가 있다. 따라서, 실제의 체류시간을 예측하는 것이 오염물질의 발생을 예측함에 있어서 매우 중요하며 예측된 체류시간을 증가 또는 감소시키기 위하여 유동장을 개선할 수 있는 방법을 제시할 수가 있다. 그리고, 다이옥신류의 경우 소각로내 비산재(fly ash)표면에서 발생하므로[1, 17] 고체 입자의 궤적을 추적하는 것은 실제 운전 중인 소각로내에서 발생하는 독성 유기물질을 제어할 수 있는 인자를 제시할 수 있다. 또, 독성 유기물질인 다이옥신류를 최소화하기 위한 소각로내 최적 조업 조건을 선택하는 것이 중요하며, 노내의 불완전 연소 반응시 생성되는 PCDD를 줄이기 위해서는 약  $1,123-1,473 K$ 의 온도에서 2초 이상의 체류시간(독일 : 생활 폐기물  $1,123 K$ , 사업장 폐기물  $1,473 K$ )을 갖도록 설계되어야 한다[18, 19].

Fig. 8은 CASE 1에 대한 고체 입자 궤적을 도시한 것인데, 소각로 하단 왼쪽의 첫 번째 화격자의 맨 왼쪽에서 투입된 입자를 P1, 여섯 번째 화격자의 가장 오른쪽에서 투입된 입자를 P60이라 하였다. 대부분의 경우에 P1-P3 사이의 입자가 투입된 직후 벽면에 부딪히다가 다시 재순환영역으로 들어가면서 20초 정도의 체류시간을 가졌

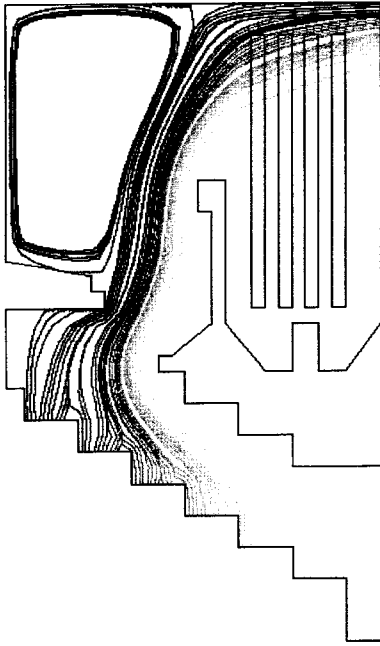


Fig. 8. The predicted particle trajectories for the CASE 1.

고, P25-P30 사이의 입자들은 가장 속도가 큰 부분만을 지나가기 때문에 가장 짧은 체류 시간을 보였다. P40-P60의 입자들은 모두가 재웅덩이(ash sump)쪽으로 휘어졌다가 배출되었다.

소각로 상단 재순환영역의 속도장은 크게 발달하지 않아 투입된 입자 중 이 영역으로 들어가 체류시간이 커지는 입자가 60개 중 3개 이하였다. 그리고, 모든 화격자에서 입자를 투입하였으므로 입자들이 지나지 않는 영역은 유체의 속도장이 발달하지 않음을 알 수 있고, 이런 영역은 체류시간의 불균등화를 초래하며 소각로의 부피만 차지하는 불필요한 부분이다.

CASE 1, 2, 3에서 P1, P2, P3의 입자는 재순환영역으로 들어가 17-18초 정도의 체류시간을 가지고 CASE 4, 5에서는 과잉공기의 증가로 속도장이 발달되어 모든 입자가 재순환영역에 들어가지 않고 소각로를 빠져나갔다.

Fig. 9는 연구대상 중 CASE 1에 대하여 60개의 고체입자를 0.1초

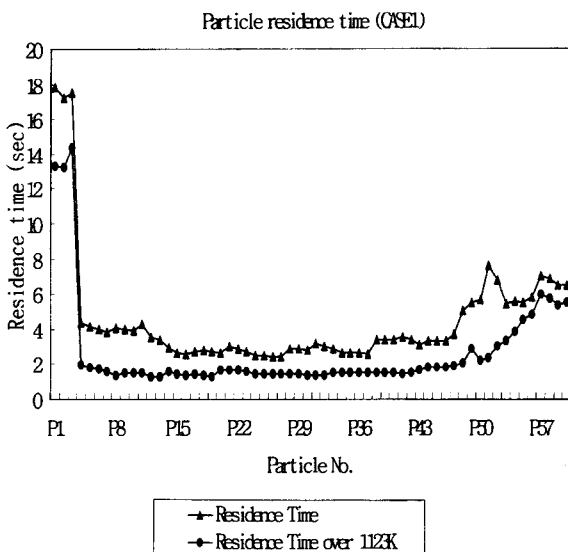


Fig. 9. The predicted particle residence time for the CASE 1.

Table 4. Comparison of residence time

CASES	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
Residence time based on the incinerator volume(sec)	14.48	13.83	12.95	11.71	10.69
Residence time based on the particle trajectory(sec)	4.51	4.18	4.07	3.42	3.56
Residence time $\geq$ 1,123 K(sec)	2.65	2.31	2.21	1.82	1.61

간격으로 위치와 온도를 추적하여 각 고체입자가 투입후 소각로를 빠져나갈 때까지의 체류시간과 1,123 K이상을 지나는 시간을 도식한 것이다. 연구 대상인 모든 CASE에 대해 평균 체류시간과 1,123 K이상의 고온 영역을 지나는 평균 체류시간을 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 소각로의 실제 체적/(주입 연료와 공기의 속도 $\times$ 단면적)으로 구한 체류시간도 함께 나타내었는데, 본 연구에서 고체입자의 궤적을 이용해서 예측한 체류시간과 큰 차이를 보이고 있다.

연구 대상의 모델 CASE에 대하여 체적/유량의 값은 10초를 넘어서고 있지만 60개 고체입자의 평균 체류시간은 3.5초에서 4.5초 사이의 값을 가진다. 이렇게 큰 차이를 보이는 이유는 속도장의 결과에서도 관찰하였던 것처럼 소각로 상단의 재순환영역과 보일러 하단 부분을 거쳐 가는 유동은 거의 없어서 이 부분의 체류시간은 약 20초에 이르고 대부분의 유동은 3초에서 4초 정도의 체류시간을 가지기 때문이다.

Fig. 9에서 보듯이 CASE 1은 18초 정도의 긴 체류시간을 가지는 고체입자를 제외하고는 대부분이 3-4초 사이의 체류시간을 가지며 재웅덩이가 부근으로 휘어졌다가 배출되는 P50이상의 고체입자는 체류시간이 5-6초 정도로 증가한다. 1,123 K이상의 고온영역을 지나는 체류시간을 보면 대부분이 2초 정도이고 전체 체류시간과 마찬가지로 P1, P2, P3 고체입자가 14초, P50이상의 고체입자가 4.5초 이상의 체류시간을 가진다. CASE 4의 경우에는 Fig. 10에서와 같이 재순환영역에 의해 체류시간이 크게 증가하는 입자가 없이 3-6초 정도의 고른 체류시간을 보이고 있다. 그러나, 이 경우 평균체류시간은 3.56

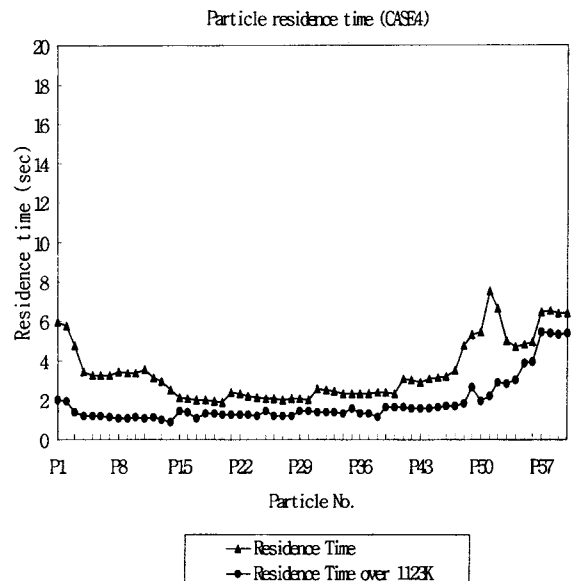


Fig. 10. The predicted particle residence time for the CASE 4.



초이지만 1,123 K 이상을 지나는 입자의 평균 체류 시간은 1.61초로 2초에 미치지 않는다. 고온영역에서의 체류시간은 2초 이하일 경우 미량의 휘발성 유기물질이나 다이옥신류 또는 다이옥신 전구물질(염화벤젠류)이 완전분해되지 않는 것으로 보고되었다[1, 18, 19].

따라서, 소각로내에서 일어나는 유동장과 온도분포를 예측하지 않고 대략적인 체류시간을 체적/유량으로 계산하면 본 연구 대상의 모든 CASE에 대하여 10초 이상의 체류시간이 예상되었으나, 본 연구 결과 전체 60개 고체입자의 평균 체류시간은 모든 경우에 대하여 3.5초에서 4.5초를 넘지 않았고 고온에서의 체류시간은 CASE 4, CASE 5의 경우 2초가 되지 않아 실제 소각로 조업조건으로는 부적당할 것으로 예상된다.

### 3. 토 의

스토커 소각로에 대한 해석으로 난류 연소 반응에서 가장 지배적인 인자(factor)를 제안하고자 한다.

본 연구의 대상인 스토커식 소각로에 대하여 1차, 2차 공기의 주입 방법에 따른 소각로의 출구에서 평균 속도, 평균 온도, 그리고 평균 일산화탄소, 질소산화물의 물분율을 다음과 같이 구하였다.

$$T_{avg} = \frac{\sum T_i}{\sum n_i} \quad (7)$$

$$V_{avg} = \frac{\sum v_i}{\sum n_i} \quad (8)$$

$$X_{CO, avg} = \sum v_i X_{CO, i} \quad (9)$$

$$X_{NO, avg} = \frac{\sum v_i X_{NO, i}}{\sum v_i} \quad i=1-70 \quad (10)$$

$$X_{CO} \text{ (at 7\% O}_2\text{)} = X_{CO, avg} \times \frac{14}{21-100 \times X_{O_2}} \quad (11)$$

$$X_{NO} \text{ (at 7\% O}_2\text{)} = X_{NO, avg} \times \frac{14}{21-100 \times X_{O_2}} \quad (12)$$

여기서  $T_i$ ,  $v_i$ ,  $X_{CO, i}$ ,  $X_{NO, i}$ 는 각각 출구의  $i$  번째 격자에서 온도, 속도, 일산화탄소 물분율, 질소산화물 물분율을 나타내며,  $\sum n_i$ 는 격자수의 합으로 본 연구에서는 70으로 하였다.  $X_{CO, avg}$ ,  $X_{NO, avg}$ 를 구함에 있어서 가중치를 고려하기 위하여 각 격자의 물분율  $C_i$ 에 속도  $v_i$ 를 곱하여 평균값을 취하였다.

Fig. 11에 2차 과잉공기량의 증가에 따른 출구의 평균 온도와 평균

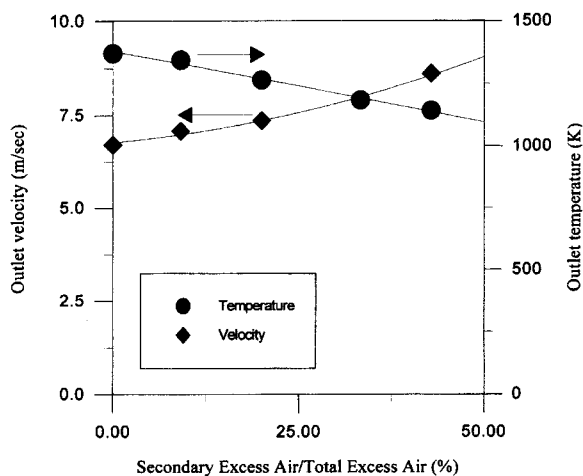


Fig. 11. Variation of outlet temperature and velocity for the cases studied.

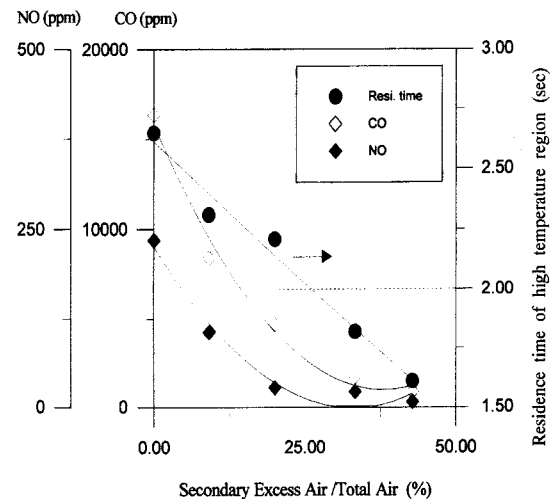


Fig. 12. Variation of CO and NO emission(ppm) and the average particle residence time through the high temperature region(over 1,123 K).

속도를 나타내었는데 과잉공기의 양이 많을수록 전체 출구 온도는 1,370 K에서 1,140 K로 낮아지고 평균속도는 6.7 m/sec에서 8.6 m/sec로 커진다. 즉, 상온의 2차 과잉공기에 의해 평균온도는 낮아지고 과잉공기의 양이 많을수록 출구를 빠져나가는 배기가스의 속도는 빨라졌다.

출구로 빠져나가는 일산화탄소의 평균 물분율은 Fig. 12에서 보듯이 점차 2차 공기의 양이 증가할수록 후연소에 의한 일산화탄소의 양이 줄어든다. Fig. 12는 본 연구 대상의 모든 경우에 대하여 CO, NO의 배출량과 1,123 K 이상에서의 체류시간을 나타내었다. 전체 과잉공기에 의해 일산화탄소가 이산화탄소로 산화되는 정도를 비교하기 위해서 모든 경우를 식 (29)를 이용하여 산소 7%로 환산하였다. 질소산화물의 평균 물분율은 2차 과잉공기가 없는 경우 230 ppm 이상으로 예측되었으며 2차 과잉공기가 150% 주입된 CASE 5의 경우 약 6 ppm 정도의 NO가 발생되는 것으로 예측되었다.

소각로 내부의 재순환영역에서는 산소과잉 영역에서의 체류시간이 증가하여 CO의 경우 대부분 CO<sub>2</sub>로 전화되는 반면 NO는 높은 발생량이 예측되었다. CO는 Table 1의 R2에 나타난 바와 같이 CO<sub>2</sub>와 화학평형을 이루는데 소각로내 2차 공기주입시 정반응이 우세하게 진행되어 CO<sub>2</sub>로 산화되지만, NO의 경우에는 고온에서 산소의 양이 많을수록 질소라디칼 및 산소라디칼이 생성량이 많아져 Table 1에 나타난 R4, R5의 정반응이 우세하게 되며 특히, 소각로내에서 생성된 재순환영역에서는 긴 체류시간으로 인하여 NO의 발생량이 증가하였다. 따라서, 소각로 연소로에서 배출되는 CO 및 NO의 양을 동시에 줄이기 위해서는 기상의 체류시간이 균등해질 수 있도록 소각로를 설계하여야 할 것이다.

Schindler의 소각로의 2차 과잉공기 증가에 따른 CO배출량의 변화 실험 DATA[6]를 비교하여 보면 경향은 거의 일치하나 이번 연구에서 예측한 CO의 양이 실험치보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 실제 소각로와 달리 이번 연구에서는 메탄의 연소 모델을 이용하였기 때문에 실제 소각로보다 높은 온도를 보였고 이는 곧 CO의 산화속도가 고온에서 느려지기 때문에 CO의 양이 높게 예측되었다. 2차 과잉공기와 전체 공기의 양의 비율이 50%를 넘어설 경우에는 실험 DATA와 마찬가지로 CO는 저온으로 인해 그 양이 증가할 것으로 예상된다. 또, NO발생량이 6 ppm 정도로 예측되었는데, 이번 연구에서 사용한 NO발생 반응식의 경우 Table 1에 나타난 Zeldovich kinetic을 사용하였는데, 저온(300-2,500 K)에서의 NO발생량을 예측하기 위

하여 다음의 식 (31)이 추가되어야 한다[13].



식 (31)이 추가된 NO발생식을 Extended Zeldovich mechanism이라 한다. 이 반응이 추가될 경우 본 연구에서 예측된 NO의 발생량보다 많은 양의 NO가 발생할 것으로 예상된다. 본 연구에서 사용한 소각로를 분석하였을 때, 최적의 조업조건을 선택하기 위하여 CO, NO의 발생량과 고온영역에서의 체류시간을 함께 평가하는 것이 필요하다. CASE 4, CASE 5가 가장 적은 양의 CO, NO를 배출하지만 고온에서의 체류시간이 2초 이하이므로 실제 소각로의 조업조건으로는 부적합하다. 따라서, 본 연구대상 CASE 중에서는 1차 과잉공기가 100%로 공급되고 2차 과잉공기가 50%로 공급되는 CASE 3이 대기오염물질의 배출을 최소화하는 최적의 조업조건이다.

본 연구의 결과로부터 소각로 내부에서 일어나는 난류반응모델에 있어서 전체 반응의 속도 결정단계(rate determining step)에 대한 고찰을 수행하였는데, 대부분의 연소반응에서 화학반응률(chemical kinetics)이 연료의 난류혼합속도(turbulent mixing rate)에 비해 그 특성시간이 매우 짧아 난류혼합시간이 전체 난류반응시간을 대표한다고 할 수 있다. 즉, 혼합이 일어나면 반응은 순간적으로 종결된다고 볼 수 있으므로 대부분의 난류반응모델은 화학적으로 매우 빠른 반응 즉, 화학 평형을 가정하는 것이 보통 사용되는 개념이다[20]. 이러한 이론을 근거로 화학반응을 고려하지 않고 냉간유동(cold flow)의 개선으로 소각로내 혼합률을 증대시키는 연구가 진행되어 왔다[2, 15]. 그러나, 이 모델은 국부 화염 냉각에 의한 화염비화(lift-off), NO<sub>x</sub>의 생성 및 소멸, 광화학적 스모그 현상 등에서는 화학반응물이 전체 반응물에 중요한 역할을 하기 때문에 모델에 고려되어야 한다.

본 연구의 Table 2에 나타난 모든 CASE에 대하여 유동에 의한 혼합인 난류 혼합 시간을 Table 3에 나타난 난류 소용돌이 지속시간이라 하고, 화학반응 특성시간을 다음과 같이 정의하였다.

$$\tau_{\text{CH}_4} = \frac{[\text{CH}_4]}{R_1} \quad (14)$$

$$\tau_{\text{CO}} = \frac{[\text{CO}]}{R_{12}} \quad (15)$$

$$\tau_{\text{NO}} = \frac{[\text{NO}]}{R_{14} + R_{15}} \quad (16)$$

식 (32)에서  $\tau_{\text{CH}_4}$ 는 메탄의 파괴 특성 시간, 식 (33)의  $\tau_{\text{CO}}$ 는 CO의 파괴 특성 시간, 그리고 식 (34)에서  $\tau_{\text{NO}}$ 는 NO 생성 특성 시간을 각각 나타내며,  $R_{12}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{15}$ 는 Table 2에 나타난 화학반응식 중에서 R<sub>2</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub>의 정반응속도이고, 각각의 메탄, CO, NO의 농도는 소각로 출구로 배출되는 양을 평균한 값을 사용하였다.

모든 CASE에 대하여 난류 혼합 시간과 화학반응 특성시간을 비교

Table 5. Comparison of characteristic time

CASES	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
Eddy life-time (sec)	9.67E-2	8.81E-2	8.56E-2	8.10E-2	7.82E-2
CH <sub>4</sub> destruction time (sec)	1.57E-8	1.73E-8	5.05E-8	8.14E-8	3.89E-7
CO destruction time (sec)	1.54E-4	2.05E-4	5.06E-4	1.47E-3	2.73E-3
NO formation time (sec)	8.25E-7	3.11E-7	9.30E-7	2.39E-6	6.10E-6
CO destruction time eddy life time (%)	0.16	0.23	0.59	1.81	3.49

하면 Table 5와 같다. Table 5에서 보듯이 난류혼합 특성시간은 10<sup>-2</sup>의 차수를 가지는 반면 화학반응 특성시간은 10<sup>-8</sup>~10<sup>-3</sup>의 차수를 보인다. 그리고, 2차 과잉공기의 양이 많아질수록 난류혼합 특성시간은 줄어드는 반면 모든 화학반응 특성시간은 증가하고 있다. 즉, 과잉공기의 양이 많을수록 화학반응의 속도가 느려지므로 전체 난류반응물을 고려할 때 화학반응물의 비중이 커짐을 알 수 있다. 즉, 전체 소각로내의 유체 및 열 전달, 화학반응 현상 중에서 가장 지배적인 것은 유동에 의한 것임을 알 수가 있으며, 전체 화학종의 양이 증가하는 경우 화학반응의 효과를 무시할 수 없다고 볼 수 있다. 또한, 2차 공기의 증가로 인하여 난류 반응의 효율이 증가하였으나, 혼합의 효율이 증가한 것으로 발생하는 CO 및 NO의 양을 정량적으로 예측할 수는 없다.

#### 4. 결 론

메탄의 연소 반응시 k-e 난류 모델과 일산화탄소, 질소산화물 반응속도식을 통해 1차, 2차 과잉공기의 분배 방법에 따른 열 · 유동장, 고체 입자 제적을 통한 체류시간의 예측 및 일산화탄소, 질소산화물의 배출량을 예측하였다.

스토커식 소각로에 있어서 연구 대상의 모든 경우에 대해 소각로 좌측 상단에 커다란 재순환영역이 존재하였고, 이것은 유체의 체류시간을 17초 이상 가지게 하여 평균 체류시간을 크게 하는 원인이 되었다. 또한 이 영역이 존재함으로써 실제의 체류시간은 (소각로 체적)/(연료 공기 유량)으로 구한 체류시간인 10초 이상에 훨씬 못미치는 3초에서 4초 사이의 값을 보인다. 또한 시간체류 시간의 불균등화가 초래되어 체류시간이 2초가 되지 못하는 입자가 많았고, 특히 고온(1,123 K 이상)의 영역에 1초 정도 머무르는 입자의 경우 독성 물질(PCB, Dioxin, VOCs 등)의 분해 온도 · 체류시간을 가지지 못한다.

일산화탄소의 경우 2차 과잉공기의 양이 증가할수록 후류에서 산소의 분배가 원활하여 그 배출량은 줄어들었고, 질소산화물의 경우 2차 과잉공기가 전체공기의 40%정도가 될 때 최소 배출량을 보였다. 이는 과잉공기의 분배 방식에 따라 소각로내 온도분포뿐만 아니라, 출구의 온도 분포 역시 달라지고, 질소산화물의 발생량은 이 출구 온도와 체류시간에 지배적임을 알았다. 일산화탄소의 양과 질소산화물의 발생량만을 비교하였을 경우, CASE 5가 가장 바람직한 조업조건이지만 CASE 5는 고온영역에서의 평균체류시간이 짧아 실제 소각로에서 발생하는 미세 유기물질들의 제어가 어려울 것으로 예상된다. 따라서 고온영역에서 평균 2초 정도의 체류시간을 가지며, 2차 공기에 의한 CO와 NO의 양을 줄일 수 있는 CASE 3, 4가 본 연구대상 시스템에서 가장 적합한 조업조건이라 할 수 있다.

본 연구결과와 대기오염물질을 최소화할 수 있는 소각공정의 개발을 위해서는 소각공정에서 일어나는 유동현상 및 화학반응에 대한 수학적 모델을 세우고, 이 모델을 근거로 소각공정 유체의 거동현상을 해석하여 소각로 설계시 가장 중요한 인자(factor)를 도출하는 연구가 매우 중요함을 알 수가 있었다. 이러한 연구결과의 활용은 오염물질 배출을 최소화한다는 환경적인 측면에서 뿐만 아니라 후처리 시설의 부하를 줄여 경제적인 측면에서도 매우 중요하다. 즉, 소각공정에서 가장 중요한 소각로내의 유동현상, 열역학적 현상 및 화학반응에 대한 이해뿐만 아니라, 후처리 시설에 대한 이해도 수반되어야 할 것이다. 이러한 연구결과는 새로운 소각로를 설계할 때 유용하게 이용될 수 있으며, 또한 현재 조업 중인 여러 소각로의 대기오염물질 발생 최소화를 위한 최적 조업조건도 제시할 수 있을 것이다.

#### 사용기호

A<sub>i</sub> : Arrhenius pre-exponential coefficient

$C_1, C_2, C_{\mu}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$	: experimental turbulence parameters
$C_{CO,avg}$	: average molar concentration of CO emission
$C_{NO,avg}$	: average molar concentration of NO emission
CO	: carbon monoxide
$C_p$	: heat capacity
$G_b$	: generation of turbulence due to buoyancy
$G_k$	: generation of turbulent energy
h	: enthalpy
$J_i$	: mass flux of component i
k	: turbulent energy
$M_i$	: molecular weight of component i
$m_i$	: mass fraction of component i
NO	: nitrogen oxide
p	: partial pressure
R	: gas-law constant
$Sc_t$	: effective Schmidt number
TA	: turbulent air
$u_i$	: flow velocity of direction i
$\bar{u}_i$	: average flow velocity of direction i
$u'_i$	: fluctuation of velocity of direction i

#### 그리스 문자

$\delta_{ij}$	: Kronecker delta
$\epsilon$	: dissipation rate of turbulent energy
$\zeta$	: random number of normal distribution
$\mu_t$	: turbulent viscosity
$\rho$	: density
$\tau$	: eddy residence time

#### 참고문헌

- Hester, R. E. and Harrison, R. M.: "Waste Incineration and the Environment", Royal Society of Chemistry, UK(1994).
- Robinson, G. F.: *Journal of the Institute of Energy*, **Sept.**, 116(1985).
- Ravichandran, M. and Gouldin, F. C.: *Sci. and Tech.*, **85**, 165(1992).
- Nasserzadeh, V., Swithenbank, J., Scott, D. and Jones, B.: *Waste Management*, **11**, 249(1991).
- Nasserzadeh, V., Swithenbank, J., Schofield, C., Scott, D. W. and Loader, A.: *Environmental Progress*, **13**, 124(1994).
- Schindler, P. J. and Nelson, L. P.: "Municipal Waste Combustion Assessment-Technical Basis for Good Combustion Practice", EPA-600/8-89-063(1989).
- Kim, S. K.: *J. Environmental Hi-Technology*, **Jan.**(1994).
- Santos, A. M.: "Study of MSW Incinerator-Overall Operation and On-Site Measurements Over the Grate", STEV-FBT-91-14 (1991).
- Shahani, G. H., Bucci, D., Vincentis, D., Goff, S. and Mucher, M. B.: *Chemical Engineering*, **Feb.**(1994).
- Fluent User's Guide V4.2, Fluent. Inc., Lebanon, NH(1993).
- Seinfeld, J. H.: "Atmospheric Chemistry and Physical of Air Pollution", A Wiley-Interscience publication, USA(1986).
- Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H.: "Fundamentals of Air Pollution Engineering", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey(1988).
- Bowman, C. T.: *Prog. Energy Combust. Sci.*, **1**, 33(1975).
- Calvert, J. G.: *The Chemistry of the Atmosphere; Its Impact on Global Change*, IUPAC, Blackwell Scientific Publication, UK(1994).
- Kim, S. K., Shin, D. H., Ryu, C. K. and Choi, S. M.: *J. Korean Solid Wastes Engineering Society*, **11**, 545(1994).
- Chomiak, J.: "Combustion(A Study in Theory, Fact and Application)", Abacus Press, Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland(1990).
- Choi, S. M.: "Private Communication and Document for Continuing Education Program", KAIST(1994).
- Kim, S. J., Kim, S. K., Yoo, Y. D. and Choi, S. M.: *J. Korean Solid Wastes Engineering Society*, **11**, 619(1994).
- Dellinger, B., Taylor, P. H. and Tirey, D. A.: "Minimization and Control of Hazardous Combustion Byproduct", EPA/600/S2-90/039 (1990).
- Um, T. I., Chang, T. S. and Chae, J. W.: *Energetika*, **2**, 54(1993).