

선회류 방식 연소시스템의 최적 조업을 위한 수치해석

김민철¹, 이재정¹, 이강우¹, 김지완², 손병현^{3*}
¹(주)유성 중앙연구소, ²(주)CDS 글로벌, ³한서대학교 환경공학과

A Numerical Calculation for the Optimum Operation of Cyclone-based Combustion System

Min-Choul Kim¹, Jae-Jeong Lee¹, Gang-Woo Lee¹, Ji-Won Kim²
and Byung-Hyun Shon^{3*}

¹Yoosung Co. Ltd., R&D Center, ²CDS global Co. Ltd.
³Dept. of Env. Eng., Hanseo Univeresity

요약 본 연구에서는 혁신적인 연소시스템의 최적 연소조건을 도출하기 위해 반응기 내부 유동 특성, 온도분포, 속도분포 및 체류시간 등에 대해 전산유체역학(CFD)을 이용한 3차원 모사를 수행하였다. 연료 투입량 1.5 ton/hr, 체류시간 1.25초, 공기비 2.1의 조건에서 연소시킬 때 로의 출구의 면적가중(area-weighted) 평균온도는 1,077℃로 나타나 에너지 회수 및 유해가스 처리에 적합한 온도임을 알 수 있었다. 배가스는 연소실 중앙부위에서 강한 선회류를 따라 최고속도 약 40~50 m/s로 덕트를 통해 배출되므로 연소실의 중심부에 강한 난류가 형성되어 연소 속도 및 연소 효율이 향상되는 것으로 나타났다. 본 시스템의 경우, 불완전 연소를 방지하고 또한 thermal NOx의 생성도 억제하기 위한 적정 조업조건은 공기비 1.9~2.1, 연료 투입량 1.25~1.5 ton/hr 정도인 것으로 나타났다.

Abstract This research carried out a 3-dimensional simulation using computerized fluid dynamics (CFD) for the flow characteristics, temperature distribution, velocity distribution and residence time, etc. in a reactor in order to derive the optimal combustion conditions of an innovative combustion system. The area-weighted average temperature of the outlet of a furnace during combustion at a condition of fuel input rate 1.5 ton/hr, residence time 1.25 sec and air/fuel ratio 2.1 was 1,077℃, which is a suitable temperature for energy recovery and treatment of air pollutants. Exhaust gas is discharged through a duct at a 40~50 m/s maximum speed along strong vortexes at the center of a combustion chamber, so strong turbulence is created at the center of a combustion chamber to enhance the combustion speed and combustion efficiency. In this system, the optimum operation conditions to prevent incomplete combustion and suppress the formation of thermal NOx were air/fuel ratio 1.9~2.1 and fuel input rate 1.25~1.5 ton/hr.

Key Words : CFD, Cyclone, Combustion, Temperature distribution, Velocity distribution

1. 서론

산업폐기물 중 자원으로서 활용 가치가 있는 물질을 폐자원이라고 할 때, 폐자원을 에너지화하기 위한 기술로는 크게 소각(연소)과 열분해 및 가스화로 구분할 수 있다. 소각(연소)은 고형물질을 재(ash)로 전환시키며 열에

너지를 회수하는 기술로써 하나의 반응기에서 다단계 공정(열분해+가스화+산화)을 거치는 과정을 의미하며, 가스화란 유기물질을 부분산화시켜 일산화탄소(CO), 수소(H₂), 메탄(CH₄) 등과 같은 혼합 가스연료 형태로 전환하는 공정이고 열분해는 산소를 공급하지 않은 상태에서 유기물질을 열적으로 분해하는 과정을 의미한다[1].

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 08지역기술혁신B-03)에 의해 수행되었습니다.

*교신저자 : 손병현(bhshon@hanseo.ac.kr)

접수일 11년 01월 03일

수정일 (1차 11년 01월 18일, 2차 11년 01월 27일)

게재확정일 11년 02월 10일

일반적으로 소각기술은 스토커식, 유동상식 및 로타리 킬른식으로 크게 분류할 수 있으며, 이들은 폐기물처리, 감량화, 안정화, 에너지화 및 고형연료 전용소각 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 소각(연소)처리 방법은 수십여년간 관련 기술 및 경험이 축적되어 액상, 고상, 그리고 반고상의 다양한 성상을 가진 폐기물에 적용 가능하도록 기술이 개발되어 현재 산업부분에서 가장 많이 이용되고 있는 방법이다. 또한 폐기물의 조성 및 연소 조건에 따라 다양한 형태의 혼합 물질(액상+고상)도 소각이 가능하여 광범위하게 적용될 수 있으며, 신기술이 계속 개발되어 연소효율, 설치비용 등이 개선되고 있다. 그러나 소각 시 발생하는 대기오염물질 제어 설비에 많은 비용이 소요되고 또한 연소실 단열을 위해 내부에 축조되는 다량의 내화벽돌로 인해 로의 본체가 커질 뿐만 아니라 내화벽돌의 축열을 위해 소모되는 에너지도 상당하며, 미연분의 완전 연소를 달성하기 위해 체류시간을 증가시키고 접촉효율을 증가시키기 위해 연소실 용적을 크게 제작해야 하는 문제점 등이 있다.

이에 본 연구에서는 기존 폐기물 처리를 주 목적으로 하는 소각로가 가진 문제점을 해결하기 위해 i)적은 설치면적, ii)낮은 유지·관리비, iii)고효율 에너지화 및 iv)내화벽돌이 없는 사이클론 연소방식의 연소시스템을 선정하고 모사해 보고자 한다. 그러나 이러한 선회류 연소방식의 연소시스템은 현재까지 실 플랜트에서 신뢰성 있게 운전된 경험이 거의 없는 실정이다. 따라서 선회류 연소방식의 로에 대한 전산유체역학을 이용하여 온도 분포, 내부 유동 흐름, 이중 유로 구조에 의한 냉각 효율 등 로 내부 유동 특성에 대한 결과를 바탕으로 최적의 연소 조건을 유지할 수 있는 로를 설계 및 제작하는데 반영하고 그 유용성을 확인하고자 한다[2-4].

2. 수치해석내용

전산유체역학이란 유체 유동을 지배하는 미분방정식들을 컴퓨터를 이용해 수치해석하는 학문분야로써 경제성, 시간절약, 완전한 정보의 제공, 실제조건에 대한 해석, 이상조건에 대한 해석 등 기존의 실험으로 인한 유동해석보다 많은 장점을 가지고 있다. 유동의 해석이 복잡한 이유는 유동의 운동 자체가 심한 비선형성을 가지며 난류, 캐비테이션, 이상유동, 자유유동, 화학반응 등을 포함하기 때문이다[5,6].

2.1 기초방정식

유체의 유동에 대한 물리적인 특성을 나타내는 기본적

인 법칙은 질량, 운동량 및 에너지 보존 법칙들이다. 정상 상태, 비압축성 기체라 가정할 때 일반적인 물리량의 수송방정식은 다음과 같다[6].

$$\text{div}(V\Phi_i - \Gamma_{\Phi_i} \text{grad}\Phi_i) = S_{\Phi_i} \quad (1)$$

여기에서 V 는 속도벡터(velocity vector)이고 Γ_{Φ_i} 는 확산 계수(diffusion coefficient)이다. S_{Φ_i} 는 부력항(S_{buoyancy})을 제외한 비정상항, 압력구배 등을 포함한 모든 source term을 나타낸다. 위 수송방정식에서 질량 보존 차원에서 물리량 Φ_i 에 밀도 ρ 를 대입하면 연속방정식, 속도장에 있어서 물리량 Φ_i 에 ρu 를 대입하면 운동량 방정식, 그리고 만약 에너지를 수송한다면 물리량 Φ_i 에 $\rho c_p T$ 를 대입하면 에너지 방정식으로 나타낼 수 있다. 또한 중력을 고려해야 한다. 이는 운동량에 체적력(=중력)인 ρg 를 추가함으로써 다음과 같이 부력항을 나타낼 수 있다.

$$-\rho\beta g\theta = -\rho\beta g(T - T_0) \quad (2)$$

식 (1)에 (2)식을 추가하면 식 (3)이 된다.

$$\text{div}(V\Phi_i - \Gamma_{\Phi_i} \text{grad}\Phi_i) = S_{\Phi_i} + S_{\text{buoyancy}} \quad (3)$$

2.2 난류 모델

난류 유동은 매우 불규칙하고, 비정상 3차원 거동을 하므로 난류 유동과 관련된 유동 현상을 수치적으로 정확하게 예측하거나 설명하기 어려워 레이놀즈수가 큰 유동에서 발생하는 난류의 물리량 수송방정식인 Navier-Stokes 방정식을 직접 풀 수는 없다[6]. 따라서 난류를 해석하기 위해 난류 모델을 도입하게 된다. 난류 모델은 난류 운동을 크게 난류 강도를 나타내는 속도 스케일과 난류 크기를 나타내는 길이 스케일, 두 가지 특성량으로 표현된다. 난류 모델은 난류 점성 계수(μ_t)를 취급하는 방법에 따라 여러 가지로 나눌 수 있는데 이러한 난류 모델 중 1974년 Launder와 Spalding에 의해 제시된 표준 k-ε 모델은 난류의 시간적으로 변동하는 속도가 시간 평균 속도와 변동분의 속도로 되어 있다는 가정하에 Navier-Stokes 방정식을 시간 평균하여 속도 변동량의 상관항이 응력 형태($\text{Re 응력항} = \text{난류 점성 계수} \times \text{속도 구배}$)인 레이놀즈 응력항을 도출해 내고, 이는 분자점성에 의해 발생하는 전단 응력과 같은 형태로 난류를 가장 잘 표현하는 모델이라 할 수 있다[7].

표준 k-ε 난류 모델은 ‘난류 점성’을 난류 운동 에너지(k)와 난류의 소산률(ε)로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

난류 점성 계수를 구하기 위해서는 난류 운동 에너지와 소산률을 알아야 하며, 난류 운동 에너지 방정식은 식 (5)와 같다.

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

또한 난류 소산률 방정식은 식 (6)과 같고 여기에서 G_k 는 난류 생성항으로서 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3} G_b) \\ & - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

자연대류의 유동은 유속이 느리기 때문에 밀도가 일정한 비압축성 유동으로 가정하고 온도변화에 의한 밀도차 효과는 부력항에만 작용한다는 Boussinesq 근사법을 적용하면 부력에 의한 일반항 G_b 는 식 (8)과 같이 된다.

$$G_b = -\beta g \left(\frac{\mu_t}{\sigma_H} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (8)$$

여기에서 C_μ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k , σ_ϵ 은 경험적으로 결정되는 실험 상수이며 표 1과 같다[6].

【표 1】 $k-\epsilon$ 모델에 사용되는 상수들

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

2.3 수치해석 조건

2.3.1 수치해석 방법

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 FLUENT를 사용하였고, 이는 난류 방정식들의 이산화 방법으로 유한체적법(finite-volume method)을 사용한다. 유한체적법은 적분 후에 이산화하기 때문에 항상 그 미소 영역내의 운동량 등의 출입을 고려하게 되어 보존 법칙을 확실하게 만족

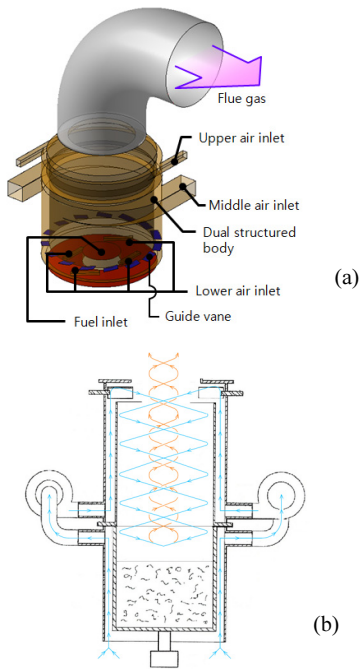
시키는 이산식을 얻을 수 있는 장점이 있다. 모든 수치해석은 상류 차분 도식(upwind differencing scheme)을 이용하여 수행하였다. 상류 차분 도식은 대류항에 대해 인공적인 확산을 새롭게 부가시킨 것, 즉 수치확산(numerical diffusion)을 도입한 것으로 안정된 해를 구할 수 있다. 그리고 압력장을 구하기 위해 연속 방정식과 운동량 방정식을 조합시키는 방법으로 SIMPLE(Semi-Implicit Method Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였다[6].

또한 수렴성을 좋게 하기 위해 하향 이완법(under-relaxation)을 사용하였다. 대수방정식의 반복해를 얻는 과정에서 반복과 반복 사이에 종속변수값의 변화를 느리게 하거나, 빠르게 하는 것이 필요한 경우가 있다. 변수들의 변화를 느리게 할 경우를 하향 이완이라 한다. 이 방법은 비선형성이 강한 문제를 반복 계산에 의하여 푸는 경우 발산을 막기 위하여 종종 사용된다. 수치해석에 필요한 기본 방정식이 비선형이므로 반복에 의한 해의 수렴이 필요하다. 반복 계산시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 잉여치(Residual : R)를 체크하면서 잉여치가 10^{-3} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다[6].

$$\max |\phi^{n+1} - \phi^n| \leq 10^{-3} \quad (9)$$

2.3.2 해석 모델 및 경계 조건

혁신적인 선회류 방식 연소시스템은 원통 형태이며 처리 용량은 36 ton/day이다. 그림 1과 같이 로는 연료통, 연소실, 배기통으로 구성되고, 연료통은 연소실 하부에 위치하여 외부에서 연료가 주입될 수 있도록 설계하였다. 연소실은 이중구조로 되어 있어 그림 1(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 송풍기를 통해 외부의 공기가 연소실 내통과 외통사이의 공간을 2단계에 걸쳐 통과하면서 내통의 온도를 차단하는 공냉효과를 발휘할 뿐만 아니라 연소공기로서 예열되어 연소실 내부로 주입된다. 주입위치는 연소실 상부, 중앙, 하부 등 3곳으로 연소실 내부 전체에 난류가 형성되도록 주입되어 연료의 완전 연소를 유도하고 또한 질소산화물의 생성을 억제[8]하는 효과도 얻을 수 있게 설계하였다. 또한 연소실에 주입되는 공기는 그림 1(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 별도의 보조장치나 보조 연료 없이 공기의 고속 회전으로 인한 원심분리에 의해 연소 영역별 공간분할(Centrifugal & Divided Space, CDS)이 이루어지도록 하여 고온 고속으로 완전 연소시킴으로써 연소물 중 가벼운 입자의 비산을 방지함은 물론 충분한 체류시간 및 혼합 구조를 갖추므로써 완전연소 시킨다.



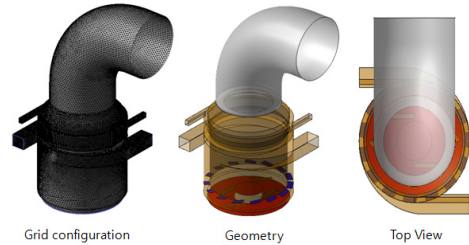
[그림 1] 연소실 내부의 공기주입에 관한 개념도

본 연구에서 사용한 시료는 폐플라스틱을 분쇄후 불연성 물질을 제거한 다음 성형을 하지 않은 미국 ASTM[9]에서 정의한 Fluff-RDF와 유사한 형태의 RPF(Refuse Plastic Fuel)이며 의 원소조성 및 특성은 표 2와 같고 삼 성분은 수분 1.54%, 가연분 89.56%, 회분 8.9%이었으며, 연소시 공급량은 1.5 ton/hr, 공기비 2.1로 고정하여 전산 모사를 수행하였다. 또한 그림 1에 나타난 바와 같이 연소용 공기는 3곳에서 주입하는데 상부에서 30%, 중앙에서 60% 그리고 하부에서 10%의 분배율로 공기를 공급하였다.

[표 2] 폐자원의 원소 조성 및 특성

구 분	RPF 품질기준	본 연구 시료	
대상 물질	폐플라스틱 함량 60% 이상	폐플라스틱 함량 60% 이상	
저위발열량	6,000 kcal/kg 이상	7,240 kcal/kg	
수분	10% 이하	1.54%	
회분	20% 이하	8.90%	
염소	2.0% 이하	1.00%	
황분	0.6% 이하	0.01%	
탄소	-	65.84%	
수소	-	10.53%	
기 타	수은	1.20 ppm 이하	0.5 ppm
	납	9.0 ppm 이하	4.3 ppm
	카드뮴	200.0 ppm 이하	44.9 ppm
	비소	13.0 ppm 이하	불검출

그림 1에 나타난 로의 수치해석을 위해 그림 2와 같이 설계 도면과 똑같은 형상으로 3차원 모형을 구현하였고 수치 계산을 위한 제어체적 구성에 사용된 격자수는 1,156,000개이다.

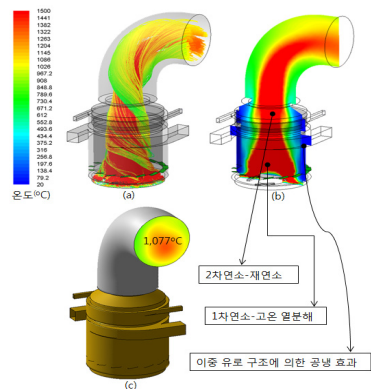


[그림 2] 수치해석을 위한 로의 그리드와 입체도

3. 결과 및 고찰

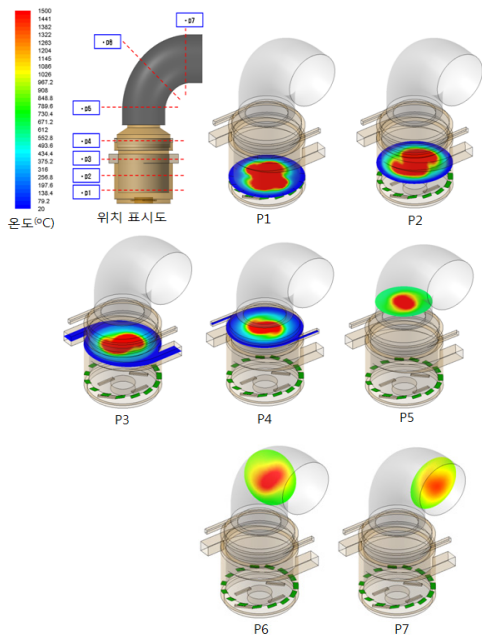
3.1 온도분포(Temperature distribution)

그림 3은 공기비 2.1, 부존자원 공급량 1.5 ton/hr로 로에서 연소시킬 때 로의 내부 온도 분포를 나타낸 것이다. 본 로의 연소용 공기는 팬으로부터 외통의 예열실을 따라 회전 상승한 후 원심력에 의해 연소실 내부의 내벽을 타고 회전 하강하여 주입되므로 연소실 내부의 연소영역에서의 기류 흐름은 회전력을 가지면서 로 중앙부분에 집중됨을 볼 수 있다. 그림 3(a) 또한 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이, 외통과 내통 사이로 찬 공기가 들어와 내통의 열을 흡수하여 예열된 후 로에 공급되므로 이중 유로 구조에 의한 공냉 효과를 확인할 수 있다. 그림 3(c)는 연소실 후단 덕트 출구에서의 면적가중(area-weighted) 평균온도로서 1,077°C로 나타나 에너지회수와 유해가스 처리에 충분한 온도임을 확인할 수 있었다.



[그림 3] 연소실 내부의 온도 분포.

그림 4는 연소실 내부의 위치별 반경방향 온도분포를 나타낸 것이다. P1은 부존자원이 투입되고 또한 연소용 공기의 10%가 주입되는 lower air inlet 위치인 연소실의 제일 하부에서의 반경방향 온도분포를 나타낸 것이고, P2는 1차연소 영역, P3 위치는 1차연소와 2차연소의 중앙위치로 연소용 공기의 60%가 주입되는 middle air inlet 위치, P4는 연소용 공기의 30%가 주입되는 upper air inlet 위치의 2차연소 영역, P5는 2차연소 영역 위 덕트 입구 부분, P6는 덕트 중앙위치, 그리고 P7은 덕트 출구 영역에서의 반경방향 온도 분포를 나타낸 것이다.



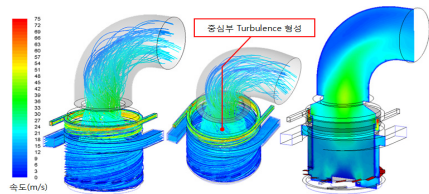
[그림 4] 연소실 내부의 위치별 온도 분포.

그림 4에서 볼 수 있듯이, P1은 부존자원이 투입되고 또한 연소용 공기의 10%가 주입되는 위치이므로 산화반응 단계가 아닌 주로 가스화가 일어나고[4] 또한 로 내벽의 온도는 상당히 낮은 온도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 여기에 주입되는 10%의 연소공기는 연소 목적 이외에도 하부 그레이트 구조물의 냉각용으로도 활용된다. P2 위치는 1차연소 영역으로서 가스화시 발생하는 gas와 본격적인 부존자원의 산화반응이 진행되는 단계로 고온의 영역이 급격히 확장되는 것을 확인할 수 있다. 이 위치는 폭발적인 반응으로 연소가 진행되며 이로 인해 연소부가 확장되어 반응기내 양압이 유지되는 위치이다. P3는 1차연소와 연소용 공기의 60%가 주입되는 middle air inlet 위치이므로 로 내벽의 저온영역이 다시 확장되는 것을 볼 수 있다. P4는 연소용 공기의 30%가 주입되

는 upper air inlet 위치의 2차연소 영역으로서 상부에서 2번째 강한 vorticity flow에 기인한 난류가 형성되어 완전 연소를 유도한다. P3 위치와 비슷한 경향을 보였다. P5~P7은 연소실 후단 위치의 덕트의 온도분포 범위를 나타낸 것으로서 체류시간의 연장으로 유해가스 처리부이며, P5위치에서 P7위치로 이동할수록 온도분포 범위는 줄어들어 P7위치에서의 온도분포 범위는 약 900~1300°C로 나타났다.

3.2 속도 분포(Velocity distribution)

그림 5는 연소실 내부의 속도분포를 나타낸 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 외통을 통과하는 연소용 공기는 속도가 낮지만 연소실 내부에서는 온도도 높고 또한 싸이클론 형태의 회전운동을 하면서 주입되어 로의 중앙부위에서 강한 선회류로 외부로 배출되므로 중앙부위에서 최고속도 약 40~50 m/s로 덕트를 통해 배출되는 것을 볼 수 있다. 또한 로의 중심부에 강한 난류가 형성되어 연소 속도 및 연소 효율의 향상되는 것으로 판단된다.



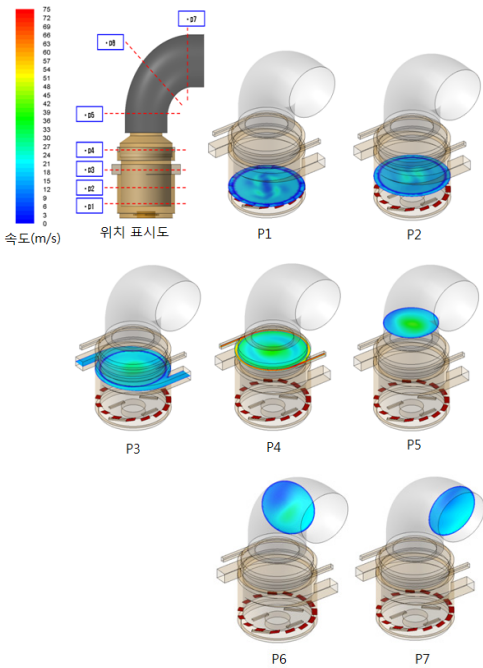
[그림 5] 연소실 내부의 속도 분포.

그림 6은 연소실 내부의 위치별 반경방향 속도분포를 나타낸 것으로서, P1부터 P7의 위치는 그림 4에서 제시한 위치와 동일하다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 각 위치별 반경방향의 속도분포는 로의 하부에서 상부로 이동할수록 속도가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 연소실 내부의 온도상승효과 및 P4위치에서 배가스량이 최대에 도달하기 때문으로 사료된다. P5 위치에서부터 P7 위치까지 덕트의 출구에 가까울수록 속도는 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 또한 반경방향 속도 분포 범위도 점차 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 덕트의 곡관부분을 통과하면서 강한 난류혼합의 영향으로 판단된다.

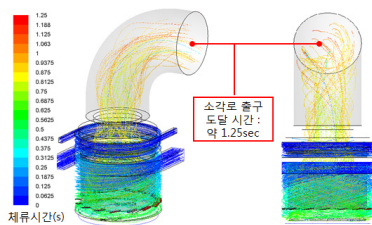
3.3 체류시간(Residence time)

그림 7은 연소실 내부의 체류 시간을 해석한 것으로서, 로 유입구로부터 출구까지 체류 시간은 약 1.25초로 확인되었다. 스토키식 연소방식의 경우 로 내부에서 연료가 미연소된 상태에서 연소장치의 상부로 빠져나가 연소 효율이 감소하는데 이를 해결하기 위해서 연소실의 크기

를 크게 하여 연소시간을 길게 연장해 주어야 하는데 이는 설치비용의 증가의 주요 원인으로 작용한다. 그러나 본 연구의 경우 로 내의 체류시간이 1.25초로 연소설비 체류시간 기준을 충분히 만족하여 고속회전에 의한 연소 효율도 좋기 때문에 연소실의 크기를 기존의 로보다 훨씬 소형으로 설계할 수 있을 것으로 판단된다.



[그림 6] 연소실 내부의 위치별 속도 분포.

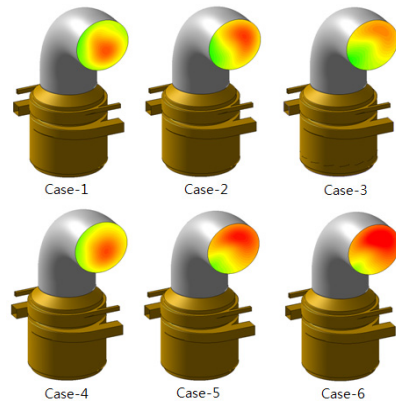


[그림 7] 연소실 내부의 공기의 체류 시간.

3.4 공기비 및 투입량

일반적으로 실제 플랜트에서 조업 시 연소실 내부로 주입되는 연료량과 연소용 공기량은 시간에 따라 주어질 범위 내에서 변동된다. 이와 같이 로가 외부의 조업변수의 부하변동에 어떻게 대응하는지를 확인하기 위해 표 3과 같이 폐자원 투입량과 공기비를 변화시키면서 6가지의 경우에 대한 출구에서의 온도변화를 예측해 보았다. 그림 8과 표 3에서 볼 수 있듯이, 6가지 경우에 대한

온도변화는 최소 1,058℃부터 최대 1,290℃로 나타났다. 본 연구의 목적은 에너지의 회수와 안정적인 운전에 있으므로 로가 안정적으로 운전되면서 덕트 출구 온도가 높으면 높을수록 바람직하다. 본 해석 결과에서는 공기비 1.7, 투입량 1.25 ton/hr가 최고의 온도를 보였지만 공기비가 1.7 이하로 너무 작으면 불완전연소가 일어나 일산화탄소와 미연탄소 같은 오염물질의 배출 가능성이 높다. 또한 로 내의 온도가 약 1,150℃ 정도가 되면 NOx의 발생량이 증가하기 시작하여 온도가 1,300℃ 이상이고 체류시간이 길면 thermal NOx의 생성이 급격히 진행[8]될 뿐만 아니라 연소설비의 유지관리에 문제를 야기할 수 있으므로 에너지 효율과 오염물질 발생량 사이의 종합적 고려 하에 공기비와 투입량을 결정해야 한다. 그러므로 본 시스템에 적합한 공기비는 1.9~2.1사이, 원료 투입량은 약 1.25~1.5 ton/hr 정도가 바람직 할 것으로 판단된다.



[그림 8] 폐자원 투입량과 공기비 변화에 따른 덕트 출구에서의 온도변화.

[표 3] 폐자원 투입량과 공기비 변화에 따른 덕트 출구온도

	공기비	투입량 (ton/hr)	로 출구 온도(℃)
Case-1	2.1	1.50	1,077
Case-2	2.1	1.25	1,110
Case-3	2.1	1.00	1,058
Case-4	2.1	0.70	1,112
Case-5	1.9	1.25	1,197
Case-6	1.7	1.25	1,290

4. 결론

본 연구는 개선된 연소시스템의 최적 조업 조건을 찾기 위해 로의 내부 온도분포, 속도 분포, 체류시간 등에

대해 3차원 전산유체해석을 수행하였으며, 결과는 다음과 같다.

1. 공기비 2.1, 폐자원 공급량 1.5 ton/hr로 로에서 연소 시킬 연소실 출구의 면적가중 평균온도는 1,077℃로 나타나 에너지회수에 충분한 온도임을 확인하였다.
2. 배가스는 연소실 중앙부위에서 강한 선회류로 최고 속도 약 40~50 m/s로 덕트를 통해 배출되므로 로의 중심부에 강한 난류가 형성되어 연소속도 및 연소효율이 향상되는 장점이 있다.
3. 본 시스템의 경우, 완전연소를 유도하고 또한 thermal NOx의 생성도 억제하기 위해서는 공기비는 1.9~2.1사이, 연료 투입량은 약 1.25~1.5 kg/hr 정도가 바람직 할 것으로 판단된다.

Nomenclatures

- V : 속도 벡터
- Γ_{Φ_i} : 확산 계수
- S_{Φ_i} : 부력항을 제외한 비정상항, 압력구배 등을 포함한 모든 source term
- k : 난류 운동 에너지
- ϵ : 소산률
- G_k : 난류 생성항
- R : 잉여치
- G_b : 부력항
- μ_t : 난류 점성 계수
- $C_{\mu}, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$: 경험적 실험상수
- ρ : 밀도
- Φ_i : 지배 방정식의 의존 변수
- g : 중력 가속도
- u, v, w : X, Y, Z방향 속도 성분

참고문헌

[1] 박영욱, 손재익, "폐기물 소각 배가스 제어기술(II)", 한국폐기물학회지, 11(3), pp. 475-487, 1994.

[2] 권영현, 김진욱, 정유진, 김민철, 이재정, 이강우, 손병현, "반건식 반응기와 백필터를 결합한 하이브리드 대기오염제어 시스템의 수치해석적 연구(I)", 한국산학기술학회논문지, 11(11), pp. 4656-4663, 2010.

[3] 현주수, 이시훈, 임영준, 천석현, "저발열량 폐가스 연소를 위한 선회연소 시스템의 운전 특성", 한국폐기물학회지, 29(2), pp. 89-96, 2003.

[4] 채재우, 박영수, 김지완, 탁선재, 곽용환, "선회식 공

간분할 연소시스템에 관한 연구", 한국폐기물자원순환학회(구 한국폐기물학회) 춘계학술연구회발표논문집, pp. 109-112, 2003.

[5] 손병현, 이강우, "산업폐기물 소각플랜트의 작업환경개선", 한국산학기술학회논문지, 7(3), pp. 431-439, 2006.

[6] 정유진, "자연환기 벤틸레이터 최적화 설계에 관한 기초 연구", 창원대학교 공학석사학위논문, 2001.

[7] B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3(2), pp. 269-289, 1974.

[8] Gang-Woo Lee, Byung-Hyun Shon, Jeong-Gun Yoo, Jong-Hyeon Jung, Kwang-Joong Oh, "The influence of mixing between NH₃ and NO for a De-NO_x reaction in the SNCR process", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 14, pp. 457 - 467, 2008.

[9] "Thesaurus on Resource Recovery Terminology", ASTM STP 832, ASTM, 1983.

김민철(Min-Choul Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 동아대학교 환경공학(공학사)
- 2005년 2월 : 부산대학교 환경공학(공학석사)
- 2005년 2월 ~ 현재 : (주) 유성중앙연구소 선임연구원

<관심분야>
산업폐기물처리, 소각로 해석 및 설계

이재정(Jae-Jeong Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 부산대학교 환경공학(공학사)
- 1998년 2월 : 부산대학교 환경공학(공학석사)
- 2003년 8월 : 부산대학교 환경공학(공학박사)
- 2008년 2월 ~ 현재 : (주) 유성중앙연구소 연구실장

<관심분야>
유해가스처리, 산업폐기물처리, 환경정책

이 강 우(Gang-woo Lee)

[정회원]



- 1995년 8월 : 부산대학교 환경공학
학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 부산대학교 환경공
학과 (공학박사)
- 2004년 7월 ~ 현재 : (주) 유성
중앙연구소 소장

<관심분야>

산업폐기물처리, 소각로 해석 및 설계, 유해가스처리

김 지 원(Ji-Won Kim)

[정회원]



- ~ 현재 : (주) 씨디에스 에너지
및 씨디에스글로벌 대표이사

<관심분야>

소각로 해석 및 설계

손 병 현(Byung-Hyun Shon)

[정회원]



- 1994년 2월 : 부산대학교 환경공
학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 부산대학교 환경공
학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학
교 환경공학과 정교수

<관심분야>

대기오염제어(탈황 및 탈질), 폐기물처리, 이산화탄소 흡수, 대기화학