

환경에너지시설내 화격자식 소각로 수치해석 연구

김종윤* · 전용한**

*서정대학교 소방안전관리과 · **상지영서대학교 소방안전과

Numerical research for Gate Type Waste Incinerators In Environment energy facilities

Jong-Yoon Kim* · Yong-Han Jeon**

*Department of Fire Safety Management, Seojeong College · **Department of Fire Protection and Safety, Sangji-Youngseo College

Abstract

This study is analyzed combustion phenomena based on the environmental energy facility incinerator. It is assumed that combustible components of waste are composed of carbon and hydrogen, and the combustion process of fuel is by setting as multi-component / multistage reaction. As the combustion chamber is burned, the high temperature environment is achieved, also the heat transfer accompanied by the turbulent flow and the generation of NO_x, a pollutant, are interpreted to predict the thermal and fluid characteristics and pollution emissions of the grate incinerator.

As the result of internal flow analysis, the slow flow around the ash chute and the mixing effect due to the complicated turbulence around the combustion chamber were predicted to show excellent performance. It is shown to the internal average temperature was about 1024° C, around the about 1000° C homogeneous temperature distribution. Due to the sudden temperature decrease in the boiler, the flue gas temperature at the outlet was estimated to be about 220 °C.

Keywords : Incinerator, Combustion, Heat transfer

1. 서론

폐기물을 처리하기 위한 방법 중 소각 처리 방법은 질량 및 부피를 최대한 줄일 수 있으며 열을 회수하여 사용할 수 있어 여러 관점으로 볼 때 매우 유용한 방법이다. 그러나 소각하는 과정에서 불완전 연소가스 및 오염 물질 등의 생성으로 인하여 여러 문제점이 도출되고 있으며 이를 해결하기 위하여 로의 효율을 높이기 위한 연구들이 지속되어지고 있다. 연소실 안에서는 전도, 복사 및 대류 등의 열전달 현상과 복잡한 변수들로 인한 3차원적 유동 현상이 나타나므로 컴퓨터를 이용한 설계가 필수적이며, 최근 컴퓨터 및 다양한 해석방법들의 발달로 오차도 많이 줄어들고 있다. 전산유

체역학은 정확하고 다양한 수학적 모델이 정립되었으나 복잡한 연소과정을 단순화 시키는 과정에서 오차 등이 포함되게 된다.

본 논문에서 연구하고자 하는 화격자식 소각로내의 연소 현상에 대한 전산유체역학 연구는 국내에서는 현재까지 미흡한 실정이며 이에 소각로 설계 시 영국, 독일, 일본 등 원본기술을 가지고 있는 해외 회사들의 연구 등을 참고하고 있는 실정이다.

이러한 배경에서 소각로내 연소현상에 대한 기초자료를 정립하고자 환경에너지 시설의 소각로를 대상으로 연소현상 해석을 실시하였다. 해석상 가연분은 탄

† Corresponding Author : Jong-Yoon Kim, Fire Safety Management, Seojeong College,

1049-56, Hwahap-ro, Eunhyeon-myeon, Yangju-si, Gyeonggi-do, E-mail: sweat100@hanmail.net

Received October 20, 2017; Revision Received November 11, 2017; Accepted December 11, 2017.

소와 수소가 이루어진 것으로 가정하였으며, 연료의 연소과정을 다성분/다단반으로 설정하였다. 연소실은 연소함에 따라 고온의 환경이 이루어지며, 난류유동과 함께 수반되는 열전달 및 공해물질인 NOx의 생성을 분석하여 화격자식 소각로의 열 및 유체적 특성과 공해배출을 예측하고자 하였다.

환경에너지 시설내부의 폐기물 소각로의 기초적인 소각 성능예측 및 관련 데이터 확보를 위하여 소각로의 연소 과정을 컴퓨터를 이용한 전산해석을 통해 고찰 하였다. 전산해석의 수행은 해석대상의 도면분석을 통한 형상 및 작성된 Grid를 이용하여 계산을 수행하고 검토 및 분석하는 절차로 진행되었으며, 해석에 사용된 Software는 ANSYS-FLUENT 패키지의 V13을 사용하였다.

2. 수치해석

2.1 화격자식 소각로 이론

2.1.1 화격자식 소각로의 형상 및 구성

화격자식 소각로의 노 본체는 내화벽돌 등의 내벽을 강판으로 피복하고 있는 형태이다. 화격자 하단에서는 1차 공기가 공급되고 화격자 상부에서 2차 공기가 공급된다. 화격자 끝단에는 보조 버너가 위치하며 하단에는 ash chute가 위치한다. 소각로 하류에서는 고압 보일러를 이용하여 스팀을 생성하며 최종적으로 필터를 통과하게 된다.

로에 투입된 폐기물은 화격자 상부에서 흡수된 수증기들이 건조되고, 화격자 중앙부에서 연소반응이 가장 활발히 나타난다. 화격자 하부에서는 불완전 연소된 폐기물의 완전연소가 일어난다. 소각온도는 설치 사이즈 별로 다양하나 일반적으로 850℃ 이상이다. 노에서 배출되는 소각재의 크기는 약 50~300 mm 정도이다.

2.1.2 폐기물 소각로의 공해방지

1) 황산화물 (SOx)

하수폐기물의 가연분중에는 통상 1~2wt.% 정도의 가연성 유황분이 포함되어 있고, 또 보조연료로 사용되는 연료중에도 미량의 유황분이 포함되어 있다. 폐기물 및 연료의 연소에 의해서 통상 700 ~800 ppm의 황산화물이 발생한다. 그러나 배가스 처리설비인 습식세정탑에서 SO₂는 비교적 용이하게 제거되고, 일반적으로 흡수율은 90%이상이다.

2) 분진

협잡물을 포함하지 않는 하수폐기물 전용의 유동층

소각로에서는 소각재가 전량 배가스와 동반해서 로외부로 비산한다. 동반된 소각재의 포집을 위해서 비교적 효율이 좋은 사이클론과 집진기가 필요하며 일반적으로 사이클론+습식세정탑의 조합의 집진방식을 사용한다. 사이클론의 집진효율은 65~80%, 건식전기집진기는 90~95%, 습식세정탑은 90~98%의 집진효율이 기대된다. 집진기의 조합으로 0.01~0.005g/Nm³ 정도로 제어가 가능하기 때문에 법규보다 낮은 농도로 저감하여 배출할 수 있다. 하수 폐기물 소각재의 응집성이나 발수성 등의 성질을 충분히 고려하여 설계하는 것이 필요하다.

3) 질소산화물 (NOx)

하수폐기물을 소각 처리하는 경우 소각로의 형식에 따라 NOx 배출농도의 차이가 있지만, NOx 발생량에 영향을 주는 인자를 고려해서 공기비를 적게 하고 Bed부의 연소온도를 일정하게 운전하는 소각을 하는 것이 NOx를 저감할 수 있는 최선의 방법이며 운전도 용이하게 된다. 일반적으로 배기가스 중의 NOx는 5~30ppm 정도 발생하고 있다. 점차 규제가 강화됨에 따라 위와 같이 공기비를 낮게 하고 운전하는 방법 외에 탈질장치를 추가하여 NOx를 저감할 수도 있다.

4) 염화수소 (HCl)

염화수소도 SO₂와 같이 물에 비교적 용이하게 흡수되서 습식세정탑에서 알칼리용액으로 세정해서 제거한다. 표에 제시된 운전데이터처럼 배가스중의 HCl은 0~30 ppm 정도 배출되어 규제치내로 제어가 가능하다.

<Table 1> Concrete Material Property

Exhaust accepted standards	item
Dust	30(12)mg/Sm ³
SOx	30(12) ppm
Nitrous Oxide	80 ppm
CO	50(12) ppm
HCl	30(12) ppm
Exhaust fumes	2ppm
Carbon disulfide	30 ppm
Hydrogen sulfide	2(12) ppm
Benzene	50 ppm

2.2 지배방정식

소각로 내부 유동 및 연소현상을 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 다른 화학종간의 화학적 반응은 일어나지 않는다.

- 유체와 벽면간의 마찰에 의해 생기는 점성소산으로 인한 온도변화는 없다.
- 정상상태의 비압축성 3차원 유동

위의 가정에 따라 이 계에 적용되는 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식:

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

운동량방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

2) 난류모델

난류유동의 계산을 위하여 가장 일반적인 Standard $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였다. Standard $k-\varepsilon$ 모델은 Reynolds Stress가 시간 평균속도 성분과 난류 점성계수(Turbulent viscosity, μ_t)에 비례적인 관계로 나타낼 수 있는 Eddy-Viscosity 모델이다. 이러한 가정은 Boussinesq 가정이 전체되어야 하며, Reynolds Stress는 다음과 같이 표현된다.

$$-\rho u_i u_j = \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

난류 유동장을 시간평균을 취함으로써 생성되는 Reynolds Stress에 관한 위의 식은 난류 점성계수 μ_t 가 점성계수 μ 와 동일한 역할을 한다는 점에서 층류 유동에서 일어나는 전단응력을 나타내는 형태와 유사하다. 그래서 Reynolds 평균 운동량 방정식은 μ 가 유효 점성계수 μ_{eff} 로 대체되는 것 이외에는 층류의 운동량 방정식과 동일하다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

난류 점성계수, μ_t 는 난류 속도 스케일(Velocity Scale)과 길이 스케일(Length Scale)의 곱에 비례한다는 가정에서 얻어진다. $k-\varepsilon$ 모델에서는 이러한 속도와 길이의 스케일은 난류 운동에너지(k)와 난류 소산율(ε)으로써 얻어진다. 속도스케일은 $k^{1/2}$, 길이 스케

일은 $k^{1/2}/\varepsilon$ 로 주어진다. 따라서 μ_t 는

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

난류 운동에너지(k)와 난류 소산율(ε)은 다음과 같은 방정식에서 구한다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{u_i}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

여기서 G_k 는 k 의 생성항이며 다음과 같다.

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

결국 난류 점성계수는 k 와 ε 으로 표현되며, 계수 $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 은 경험적 수치로 다음과 같다.

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (9)$$

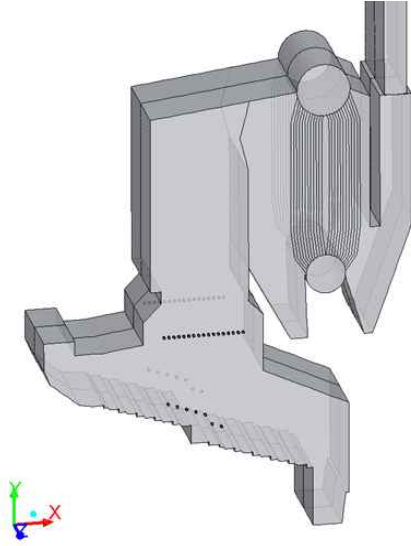
3. 결과 및 고찰

3.1 소각로 해석

3.1.1 경계조건 및 형상

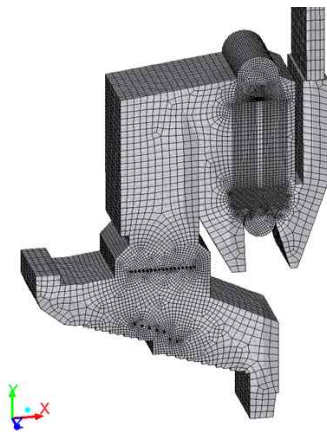
[Figure 1]과 [Figure 2]는 폐기물 소각로의 3D 형상 및 격자 형상을 나타낸 것이다. 하단의 계단형상의 화격자 하부에서 공기가 공급되어 화격자 상부의 연료와 혼합되어 연소반응을 일으킨다. 연소반응이 가장 활발히 일어나는 화격자 상부 중앙에는 2차 공기노즐이 위치한다. 2차 연소실을 통과한 연소가스는 보일러를 통과하며 약 200°C로 급격하게 냉각된다. 본 해석에서는 보일러까지 형상을 고려하여 해석을 진행하였으며, 보일러의 경우 energy equation에 대한 temperature sink term으로 작용하는 것으로 가정하였다.

소각로의 해석 시 고려되는 물리적 모델 중 화학반응 및 복사열전달은 높은 quality의 격자형상이 요구된다.



[Figure 1] 3D Modeling of Gate type waste incinerator

따라서 [Figure 2]에 나타난 바와 같이 소각로 내 격자는 모두 육면체 구조의 hexahedral 격자로 구성하였다. 또한, 소각로의 특성상 벽면 및 경계면에서 일어나는 물리적 특성이 유동 및 열전달에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 경계면의 특성을 고려하여 boundary layer meshing을 사용하였고 이를 통해 벽면 및 경계면에서 계산의 정확도를 높였다. 총 격자수는 약 100,000개 이다.

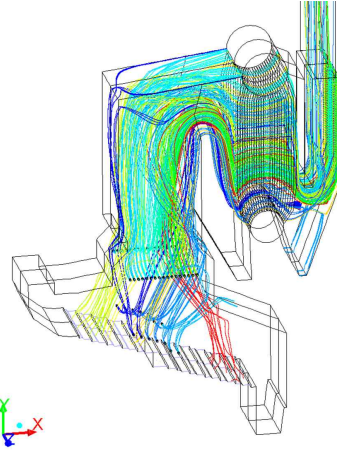


[Figure 2] 3D Modeling grids of Gate type waste incinerator

3.1.2 기본 형상에 대한 열 및 유동해석 고찰

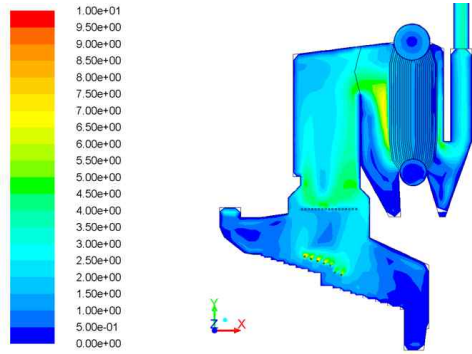
[Figure 3]은 소각로 내부의 유동에 대한 pathline을 나타낸다. 화격자 끝단 및 보일러 앞 뒤로 존재하는 deadzone은 ash chute 상단에 존재하여 효율적으로 ash를 포집 할 수 있다. 화격자 상부 및 상부 연소실

로 연결되는 목 부위에서는 활발하게 mixing이 발생하여 잔류 가연분을 모두 효율적으로 연소시킨다. 특히 2차 공기 노즐의 빠른 제트류가 로 중앙면에서 충돌하여 혼합유동을 향상시킨다. 이러한 노 중앙의 복잡한 혼합 유동은 입자형태의 고형연료 혼합 및 연소를 촉진하며, 하단에서 불완전 연소가스가 완전 연소하도록 유도한다.

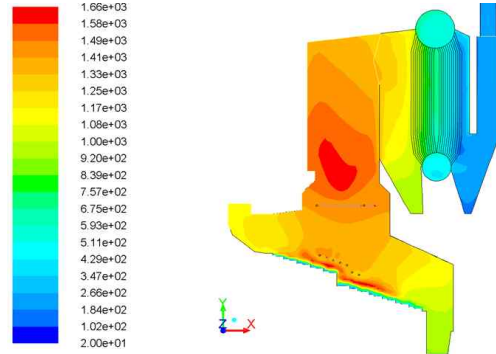


[Figure 3] Pathline of Gate type waste incinerator

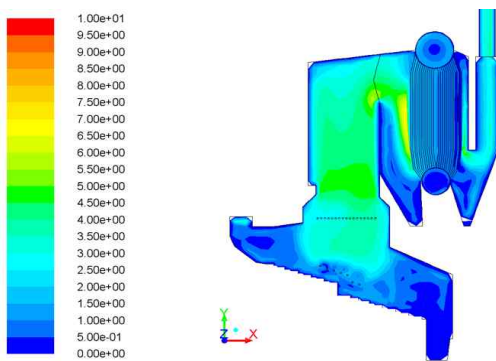
[Figure 4]와 [Figure 5]에는 노 내부 단면의 속도 분포를 나타내었다. 노즐의 제트류가 충돌하는 중앙단면에서는 상대속도가 0이 되어 제트류가 나타나지 않으나, 1/4 단면에서는 노즐의 제트류로 인한 속도분포가 명확히 나타난다. 연소실 내부에서는 전체적으로 상승류가 발생하지만, 연소실 좌우 벽면에서 공급되는 2차공기 노즐 주변에서는 충돌로 인하여 평면방향으로 확산하는 유동이 지배적이다. 화격자 끝단에서는 유동이 느린 속도로 안정되어 ash 등의 날림을 최소화 줄이고 ash chute로 모이게 된다. ash chute는 보일러 앞 뒤에 추가적으로 위치하여 연소가스에 entrain되어 이동한 fly ash가 재차 포집될 수 있도록 되어있다. 해석결과 ash chute상부에서 유속이 급격히 감소하여 효과적으로 fly ash가 포집될 것으로 예측되었다. 보일러 주변에서는 다수의 전열관 배열로 인하여 연소가스 속도가 느려지게 되며, 따라서 전열관 주변의 체류시간이 증가하여 충분한 열교환이 이루어 질 수 있게 된다.



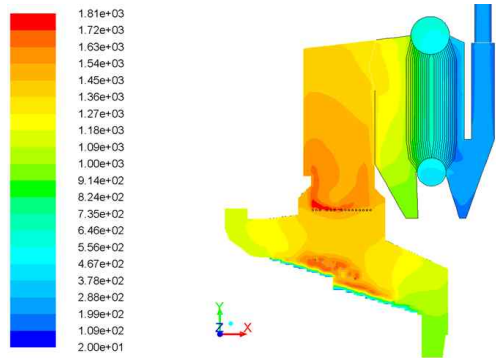
[Figure 4] Velocity of Gate type waste incinerator(Center)



[Figure 6] Temperature of Gate type waste incinerator(Center)



[Figure 5] Pathline of Gate type waste incinerator(1/4 Single side)

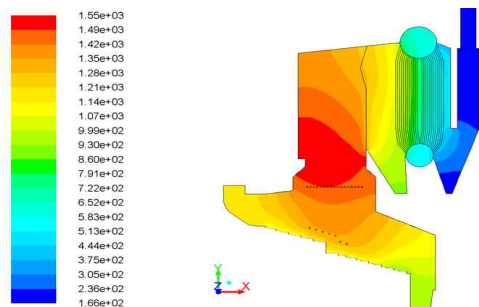


[Figure 7] Temperature of Gate type waste incinerator(1/4 Single side)

[Figure 6]과 [Figure 7]은 소각로 내 중앙 단면 및 1/4 단면에서의 온도분포를 나타내었다. 시뮬레이션 결과 로 내 평균온도는 1024.85℃로 예측되었으며 이때 보일러를 통과한 연소가스 온도는 224℃로 예측되었다. 노 내부의 온도는 화격자 중앙 부분의 상부와 2차 연소실로 연결되는 공기노즐 상부에서 가장 높게 예측된다.

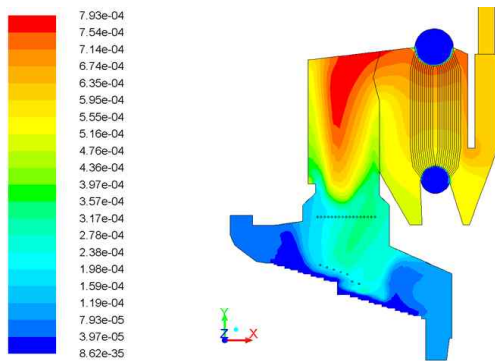
화격자 상부의 경우 가연분 연료에 포함된 수분증발로 인한 증발잠열 및 공급 산소 대비 높은 가연분 비율로 인하여 온도가 화격자 중앙보다 낮게 예측되는 반면, 화격자 하부의 경우 가연 연료비율이 줄어들고 상대적으로 ash의 비율이 늘어나기 때문에 온도가 중앙부 보다 낮게 예측된다. 또한 공급된 공기의 상승기류를 타고 상승한 가연분 및 불완전 연소성분들이 2차 공급공기노즐을 지나면서 완전히 산화되므로 2차 공기노즐 상단에서 다시 온도가 상승하는 경향을 보인다. 이후 연소가스는 보일러를 통과하면서 열교환을 통하여 약 800℃ 이상의 큰 온도차를 보이며 급격히 온도가 낮아진다.

[Figure 8]은 로 내부의 복사온도(radiation temperature) 분포도를 나타낸 것이다. 복사온도는 조사된 복사강도를 스테판-볼츠만 상수로 나눈 것으로 복사열전달에 의한 열전달을 온도의 단위로 나타낸 것이다. 복사온도 분포도의 경우 800K이상의 고온조건에서 온도분포의 기하학적 공간 평균의 실질 온도조건을 반영할 수 있다. [Figure 8]에 나타난 바와 같이 화격자 상부보다는 2차 공기노즐 상부 및 2차연소실 주변에서 복사온도가 가장 높게 예측된 것을 확인 할 수 있다.

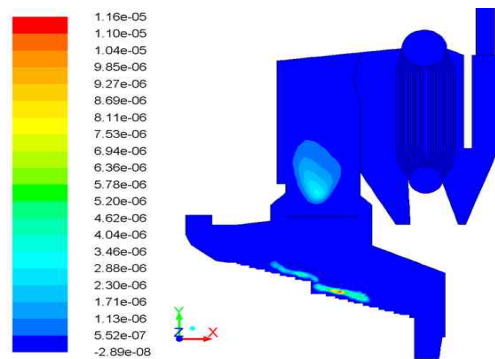


[Figure 8] Radiation temperature of Gate type waste incinerator

[Figure 9]와 [Figure 10]에 소각로 내 NOx 및 NOx 생성률 분포를 나타내었다. NOx 생성은 화격자와 1차 공기노즐 사이와 2차 공기노즐 상부 목 부분에서 높게 나타난다. 화격자와 1차 공기노즐 사이의 NOx 발생의 경우 fuel-rich 조건에 의한 불완전 연소로 인한 NOx 생성이 지배적이며, 2차 공기노즐 상부의 경우 온도영향으로 인한 thermal NOx 생성이 주요 메커니즘이다. 본 해석에서는 요소수 분사등을 통한 별도의 NOx 저감 기법을 고려하지 않았기 때문에 발생한 NOx는 약 540ppm으로 예측되었다.



[Figure 9] NOx of Gate type waste incinerator(Center)



[Figure 10] NOx of Gate type waste incinerator(Center)

4. 결론

소각로에 대한 열유동 및 연소반응 해석을 수행하였다. 소각로의 전산해석은 열유동 및 연소해석 시 신뢰성이 가장 높은 전산유체역학 프로그램 중 하나인

ANSYS-FLUENT를 이용하여 내부 유동현상 및 온도 분포예측, 오염물질 배출을 예측하였다. 내부 유동해석 결과, ash chute 주변의 느린 유속분포, 연소실 주변의 복잡한 난류로 인한 혼합효과가 예측되어 우수한 성능을 보일 것으로 판단되었으며, 내부 평균온도는 약 1024℃로 나타났으며, 1000℃ 내외에서 균일한 온도 분포를 보였다. 보일러에서 급격한 온도 감소로 인하여 출구에서는 연소가스 온도가 약 220℃로 예측되었다.

5. References

- [1] Lee, Y.S.(2010), "A Study on the Setting of CFD Boundary Condition for Hot Flow Grate Type Incinerator." KOSCO Syposium.
- [2] Yoo, C.K.(2002), "Discussion on the Practical Use of CFD for Grate Type Waste Incinerators." JJ. Korea Society for Computational Fluids Engineering. Vol. 7 No. 3 September : 17-26
- [3] Ko, Y.G.(2002), "Numerical Simulation of Waste Bed Combustion and Gas Flow in a Grate-type Waste Incinerator" KSME Syposium : 1244-1249.
- [4] Sung, D.M.(1997), "A Study on the Combustion Characteristics of the Small Grate Type Industrial Wastes Incinerator ." J. KSWM. Vol. 14 No. 6 March : 579-587
- [5] Ahmed, S.A and Nejsd, A.S(1992), "Velocity Measurement in a Research combustor Psrt 1 : Isothermal Swirling FLOW," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol 5 : 162-174
- [6] Drake, M.C.and Blint, R.J.(1991), "Calculations of NOx Formation Pathways in Propagating Laminar, High Pressure Premixed CH4/Air Flames, " Combustion Science and Technology, Vol 75 : 261-285
- [7] Ansys CFX 13.0 Teory Guide & User' s Guide.

저 자 소개

김 종 윤



인하대학교 인하대학원 기계공학박사
취득. 현재 서정대학교 소방안전관리
과 조교수로 재직 중
관심분야 : 기계공학, 화재안전, 산업
안전 등



인하대학교 인하대학원 기계공학박사
취득. 현재 상지영서대학교 소방안전
과 부교수 재직 중
관심분야 : CFD 해석, 터널화재, 열
전달 등