산업기술연구 (강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제20권, 2000.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Nat'l Univ.,Korea, No. 20, 2000.

소형 소각로에서 운전조건과 온도분포 사이의 관계 분석

Analysis of the relationship between operational condition and temperature distribution in a small incinerator

김 성 준* 박 종 환** 전 봉 준***
Kim, Sung-Joon Park, Jong-Hwan Chun, Bong-Jun

Abstract

One aims to find out how the operation condition of secondary inlet angle effects the temperature distribution inside a small incinerator. A finite volume commercial code, PHOENICS, is used to simulate the temperature field in an incinerator. The computational grid system is constructed by Multi-Block technique. The governing equations based on the curvilinear coordinates are used. Numerical experiments are done with the five variations of secondary air inlet. The temperature distribution is quantified by the statistical deviation of temperature in an incinerator. The computational analysis says that the certain angle of secondary air inlet could improve the uniformity of temperature distribution in an incinerator.

키워드 : *소각로, 입구각, 온도분포 균일도*
Keywords : Incinerator, Inlet angle, Uniformity of temperature distribution

1. 서론

우리나라의 현재 소각로 설계 및 제작 기술은 외국 기술에 의존하거나 소각로를 외국에서 수입하는 경우가 대부분이다. 그러나 외국 쓰레기와는 다르게 수분 함유량이 많고 발열량이 적은 국내 쓰레기 특성상 외국 소각 기술은 우리나라의 쓰레기 처리에 많은 어려움이 있는 것이 사실이다[1]. 따라서 우리나라 쓰레기 성상에 맞는 소각로 기술의 개발이 절실히 요구되지만 소형 소각로를 주로 생산하는 중소기업의 경우 연구 개발인력의 부족과 연구 자금의 부족으로 기술개발이 정체되어 있거나 전혀 진행되지 못하는 실정이다. 따라서 본 연구는 이러한 중소 기업의 열악한 환경과 관련하여 산학연 협동으로 연구를 하게 되었으며 최적 연소 조건과 관련된 내부 유동을 중심으로 연구하게 되었다.

소각로를 설계하는데 있어서 설계자가 고려해야 할 중요 사항중의 하나는 연소실 내부에 최적의 연소조건이 이루어지도록 하여 배기가스 생성을 최소화하는 것이다. 일반적으로 소각로내 최적 연소 조건은 3T(Time, Temperature, Turbulence)의 개념[2]으로 표현되어 진다. 소각로 내부의 온도는 대개 850-1000℃ 사이가 바람직하며[3][4] 공기와 연소가스의 충분한 혼합과 2초 이상의 적정 체류시간은 소각로를 설계할 때 설계자가 고려해야 하는 기본 설계 조건이다. 특히, 1000℃ 이상의 온도는 NOx와 같은 공해 물질이 생성되기 쉬운 온

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사
** 서울정수기능대학 건축설비 자동화과 조교수
***인천기능대학 자동차학과 조교수

도이므로 고온 지역을 최소화하도록 하고[5][6] 오염 물질 저감을 위해서 소각로 내부의 균일한 온도분포가 유지하도록 하는 유동의 제어가 필요하다[7]. 또한 2차 공기 주입방식은 소각로 내부의 유동 패턴에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소로서 이와 관련된 연구는 이미 오래전부터 연구되었고 지금도 상당히 활발히 진행 중이다.

Fehr, M.[8] 등은 소각로내 냉간유동실험을 통해 공해물질 억제에 효과적인 가스유동에 대하여 연구하여 재순환 영역을 최소화하는 2차 공기 주입비를 찾아내었으며 Nasserzadeh, V.[9][10]등은 수치모사를 통해 기존 소각로형상의 개선책을 제시하고 연소효율 및 열전달율을 향상시킨 모델을 제시한바 있다.

그 외 일본의 Kawasaki 중공업[11], 일본의 고베(Kobe)철강[12], 독일의 Martin사[13], Ravichandran과 Gouldin[14]등도 수치 실험과 모형 실험을 통해서 공기 주입 방식의 중요성을 강조하였다. 따라서 본 연구에서는 30kg/hr형 소형 소각로를 대상으로 소각로 내부의 열유동장을 제어하는 중요 인자로 알려져 있는 2차 공기 주입각도[15]를 15°에서 75°까지 15°씩 증가시키면서 주입 각도가 온도 분포 균일도에 미치는 영향을 수치 해석하였다.

2. 지배 방정식 및 경계 조건

2.1 지배 방정식(좌표계)

본 연구에서는 소각로 내부의 유동장과 온도장을 모사하기 위해서 SIMPLEST 알고리즘을 적용한 범용 해석 코드인 PHOENICS[16]를 사용하였다. 여기서는 편의상 직교 좌표계를 기준으로 한 지배방정식을 소개하고 있으나, PHOENICS에서 실제로 수치해석을 수행할 때 사용한 지배방정식은 BFC(Body Fitted Coordinate)로 좌표전환한 방정식이다. 비 압축성 정상상태의 연속방정식과 운동량방정식 그리고 온도를 종속변수로 하는 에너지방정식을 본 연구의 3차원 열유동 현상을 모사하는 지배방정식으로 사용하였다. 본 연구에서는 사용한 지배방정식은 다음과 같다.

* 연속 방정식

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

*운동량 방정식

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

여기서

$$\tau_{ij}=-(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k_{ij}\delta$$

*에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_p u_i T)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k+\frac{\mu_t}{\sigma_T}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}+Q \qquad (3)$$

2.2 난류 모델

난류 모델은 난류유동 해석에 가장 폭넓게 사용되고 있는 $k-\varepsilon$모델을 사용하였다. $k-\varepsilon$ 모델은 수많은 실험과 검증을 통하여 그 유용성이 입증되어있으며, 실제로 현재 소각로내 열유동장의 수치해석 연구[17]사용되고 있다. 따라서 본 논문에서도 $k-\varepsilon$ 모델을 도입하여 사용하였으며 본 논문에서 사용한 지배 방정식은 다음과 같다

*Turbulent kinetic energy equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}+G-\rho\varepsilon \qquad (4)$$

*Turbulent kinetic energy dissipation equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}$$

$$+\frac{\varepsilon}{k}(C_1 G-C_2\rho\varepsilon) \qquad (5)$$

2.3 소각로 형상 및 운전 조건

소각 대상 폐기물에 대한 물리적, 화학적 조성의 데이터[18]가 소각로 설계의 해석 조건을 구하기 위해서 (주)삼호 보일러에 의해 제공되었고, 소각능력이 30kg/hr인 SVIM-B-30A 모델을 기준으로 하였다. 1차 연소실의 규격은 내부 직경 700mm 그리고 높이 1170mm이고 2차 연소실의 규격은 내부 직경 500mm, 높이 895mm를 나타내었다. 따라서 연소실의 내부 규격을 수치 해석을 위한 격자망의 치수로서 사용하였다. 1차 공기의 주입구 면적은 0.11m^{2}이고 2차 공기의 주입구 면적은 0.01m^{2}이며 소각로 가스 출구의 면적은 0.11m^2 이다. Fig. 1은 본 연구 대상인 소각로의 개략적인 설계도를 나타낸 것이다. 시간당 소각능력은 30kg이고 소각용 공기공급량은 11.57 Nm^3/kg 이다. 에너지방정식에 열원을 주어 연소에 의한 발열을 모사하였고 화학반응은 전혀 고려하지 않았다.

연구 대상인 소형 소각로는 수평 화격자식으로 화격자 아래부분에서 공급되는 1차 공기와 위 부분에서 공급하는 2차 공기로 반분하여 연소실에 연소용 공기를 공급하였다. 1차 및 2차 공기 입구에서의 공기 온도는 20℃로 하였고 Fig. 2에 도시한 바와 같이 1차 공기 입구는 1차 연소실 하단부에서 소각로 축 방향 첫 번째 셀로 원주방향 전체이고 소각로 옆면에 수직으로 1차 공기가 공급되고 있다. 2차 공기 입구는 1차 연소실의 상단부에 있으며 출구 반대편 3개의 계산 세포에 걸쳐 위치

하고 있다. 2차 공기는 2차 공기 입구를 통해 원주방향으로 유입되어 1차 연소실에 선회류가 형성된다. 2차 공기의 속도 성분을 Fig. 3에 나타내었으며 W는 소각로의 축 방향 속도 성분으로 1차 연소실 상 단면에 수직하며 U는 원주방향 속도성분이고 θ는 2차 공기 주입각도로 수평으로부터 측정하였다. 1차 연소실에 공급되는 공기의 양은 주입각도 변화와 관계없이 일정해야하므로 W값은 일정하게 두고 주입각도 변화에 따라 원주방향 속도성분 값만 변화를 주어 선회류의 정도를 조절하였다. 소각로 내부에 형성되는 화염은 열을 계속해서 소각로에 공급하는 열원으로 취급하였으며 화학 반응은 고려하지 않았고 Dulong의 식[6]을 사용하여 Table 1[18]의 쓰레기 성상을 대상으로 저위 발열량을 계산하였으며 그 값은 4214 kcal/kg 이었다. 본 연구에서 채택한 완벽한 단열벽 조건이 외벽 열 손실이 있는 실제와 다르기 때문에 이를 고려하여 소각로 출구의 온도가 900℃ 정도가 되도록 발열량에 곱하는 인자값을 수치실험을 통해 결정하였다. 계산한 이론적 저위발열량에 70%를 곱하여 소각에 의한 발열량으로 하였고 수치해석의 독립변수는 2차 공기 주입각으로 하였으며 종속 변수는 온도 분포와 그 균일도로 하였다. 주입각도를 15° 간격으로 15° 에서 75° 까지 변화시켜 수치계산을 수행하였다.

3. 수치 해석 방법

본 연구는 상용 유체 해석 프로그램인 PHOENICS를 사용하여 소각로를 설계하고 내부 유동 현상을 모사하였다. 수치해석용 격자망 구성은 PHOENICS 에서 제공되는 MBFGE (Multi Blockgrid and Fine Grid Embedding)기법[19]을 사용하여 수행하였다. 계산 격자망 구성을 위해 사용한 블록의 수는 모두 4개이며 총 7000개의 계산 세포를 필요로 하였다. 구성된 격자망이 Fig. 4에 도시되어 있으며 하부의 원통부분이 1차 연소실이고 2차 연소실은 상부의 원통부분이며 2차 연소실에 연소가스의 출구가 붙어있다.

지배방정식을 차분화하는 기법으로 계산시간과 수치계산의 안정성 확보를 고려하여 1차 정확도의 Hybrid법[20]을 사용하고 차분식 풀이방법으로 압력장은 홀필드(whole field) 방법을 사용하고 다른 종속변수에 대해서는 슬랩바이슬랩(slab by slab) 방법을 적용하였다[21]. 수치 해석의 수렴 조건은 질량 유동량의 1000 분의 1인 질량 잔류값으로 하였고 대개 반복계산횟수 3000에서 수렴 해를 구할 수 있었으며 계산시간은 43000초 정도이었다. 컴퓨터는 펜티엄III(CPU 500MHz)를 사용하였다.

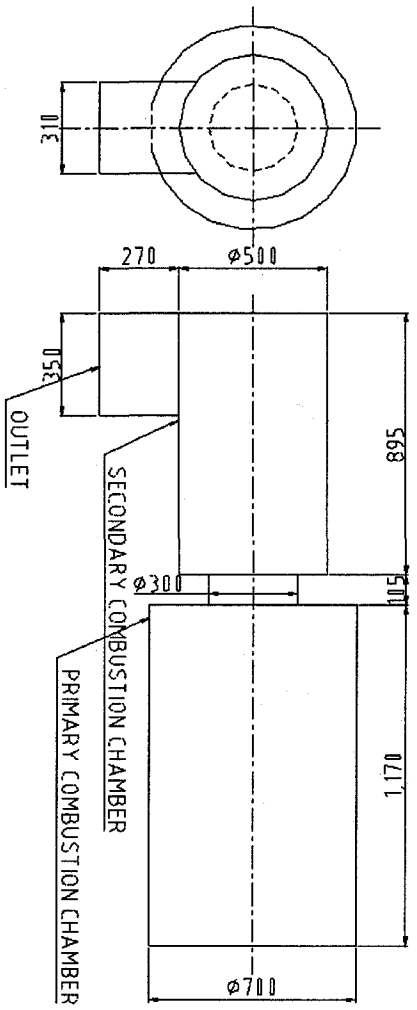

Fig. 1 Dimensions of incinerator

Table 1. Compositions of waste [5]

Waste type	Physical composition (%)	Chemical composition (%)						
		C	H	O	N	S	A	W
Papers	40	38.97	5.22	39.78	0.22	0.18	5.39	10.24
Woods	25	40.36	4.78	33.90	0.12	0.04	0.80	20.00
Polyethylene	10	84.37	14.15	0.00	0.06	0.03	1.19	0.20
Textile	10	39.26	5.45	35.57	1.85	0.17	2.70	15.00
Plastics	15	59.28	7.11	22.33	0.00	0.00	10.08	1.20
Mixed waste(with moisture)	100	46.93	6.31	31.29	0.31	0.10	4.26	10.8

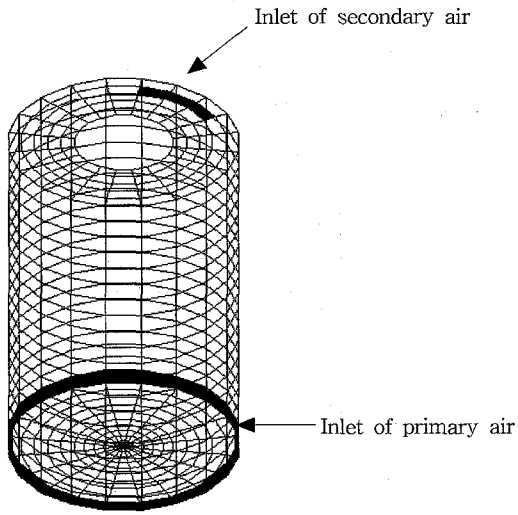

Fig. 2 Locations of 1st and 2nd air inlet

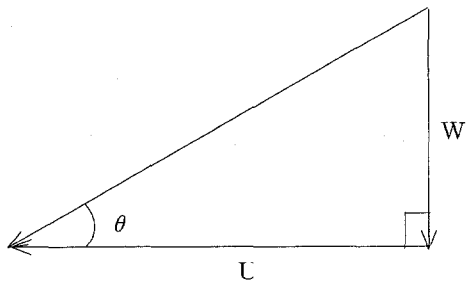

Fig. 3 Velocity components of secondary air

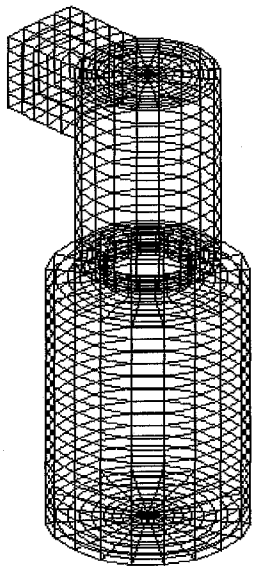

Fig. 4 Oblique view of computational grid system

4. 수치 해석 결과 및 고찰

Fig. 5는 2차 공기의 주입 각도가 15°일 때 소각로 내부의 온도영역별 체적 백분율이다. 이 경우는 5개의 주입 각도 중 원주방향 속도성분이 가장 큰 경우이다. 소각로 내부의 적절한 연소 가스 온도로 여기고 있는 850℃와 1000℃ 사이의 온도 분포는

전체 체적의 52.2%를 차지하였다. 1000℃ 이상의 고온지역은 연소실 전체 체적의 20.3%를 차지하였다. 온도분포의 표준 편차를 계산하여 본 결과 그 값이 403이었으며 소각로 출구 부분의 온도는 섭씨 910℃ 이었다. 수치 계산적으로 최고 온도가 4700℃, 최저 온도가 215℃로 나타나 비교적 소각로 내부의 온도 편차가 크게 나타났으며 특히 이런 초고온 분포는 1차 연소실의 화염근처에 분포하였다. 화염 온도 1500℃ 이상은 NOx발생되기 쉬운 조건으로 지나치게 높은 화염 온도로 볼 때 질소 산화물 방지 측면에서 부정적인 영향을 보인다[22]. 200℃ 이하의 초저온영역은 존재하지 않았으나 1차 및 2차 공기 주입구와 1차 연소실 벽 근처에서 낮은 온도 분포를 나타내었다. 소각로의 저공해특성에 지대한 영향을 미치는 2차 연소실에서의 온도는 880℃에서 920℃ 정도의 온도분포 영역을 보였다.

2차 공기의 주입 각도를 30°로 증가시켰을 경우 소각로 내부의 온도 영역별 체적 백분율이 Fig. 6에 도시되어 있다. 주입각도 15° 경우의 온도 분포 영역과 비교하여 볼 때 최고 온도가 떨어지고 온도 분포 범위도 좁아졌음을 알 수 있다. 온도 분포의 표준편차 값은 5개의 주입각도중에서 가장 적은 352이었으며 온도분포의 균일도가 개선되었음을 볼 수 있었다. 2차 연소실의 온도분포는 843℃에서 975℃ 정도로 주입각도 15°와 비교할 때 온도분포 영역이 조금 넓어졌으나 적정 온도 범위내에 있음을 알 수 있다. 또한 1000℃ 이상의 고온영역 체적도 약간 높은 값을 가졌다. 그럼에도 불구하고 최고 온도가 대폭 낮아짐에 따라 온도 분포의 균일도는 좋아졌다. 200℃ 이하의 초 저온 부근은 전체 체적의 0.7%를 차지했으며 화염에서의 온도더 현저하게 떨어졌다.

2차 공기 주입각이 45° 일 때의 온도 분포 영역은 30°의 경우와 유사하나 200℃ 이하의 저온 부분이 더 존재함을 Fig. 7에서 확인 할 수 있었다. 1000 ℃ 이상의 고온영역은 전체 연소실 체적의 21.4%를 차지했다. 섭씨 200℃ 이하의 낮은 온도 영역이 전체 소각로 체적의 2.6%를 차지해 30°에 비해 4배 가까이 증가하였다. 온도 분포의 표준 편차값이 361로 주입각도 30°보다 약간 그 값이 커졌다. 2차 연소실의 온도 분포 영역은 섭씨 800에서 980℃에 이르는 분포를 보여 2차 공기 주입 각도가 증가할수록 온도 분포 범위가 점점 넓어짐을 알 수 있으나 그 변화량은 크지 않았다. 또한 1차 및 2차 공기 주입구 부분에서 섭씨 100℃ 이하의 낮은 온도 영역이 있음을 확인할 수 있었다. 화염의 온도는 약간 떨어지기는 하였으나 대체적으로 주입 각도 30°와 비슷한 온도 분포를 보이고 있다.

주입 각도가 60°일 때의 온도영역별 체적 백분율을 Fig. 8에 나타내었다. 소각로 내부의 2차 연소실 온도 분포 범위는 앞의 각도보다 더 넓어진 섭씨 780℃에서 990℃에 이르는 온도 영역을 관찰할 수 있었다. 1000℃ 이상의 온도영역이 전체 체적의 22.6%로 45°와 비슷한 분포를 보였으며 200℃ 이하의 낮은 온도 영역은 전체 체적의 3.08%로 45°보다 증가하였다. 표준 편차 값이 406으로 증가하여 전체 로내의 온도 분포영역이 다시 넓어짐을 알 수 있었다.

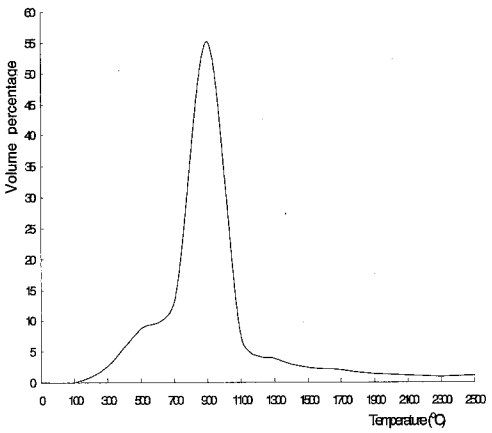

Fig. 5 Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 15°

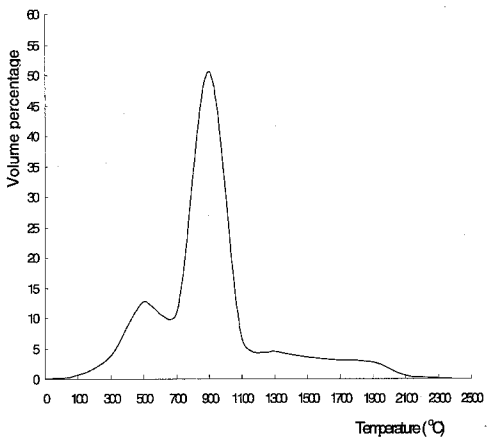

Fig. 6 Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 30°

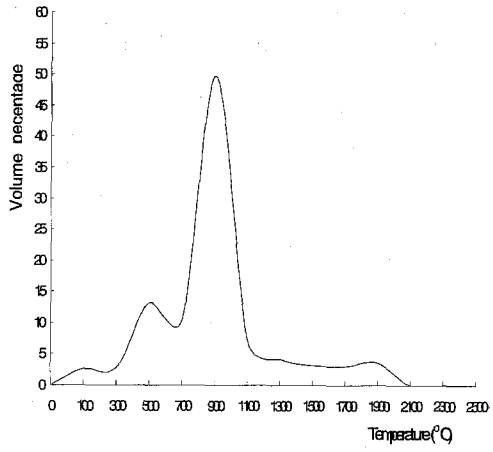

Fig. 7 Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 45°

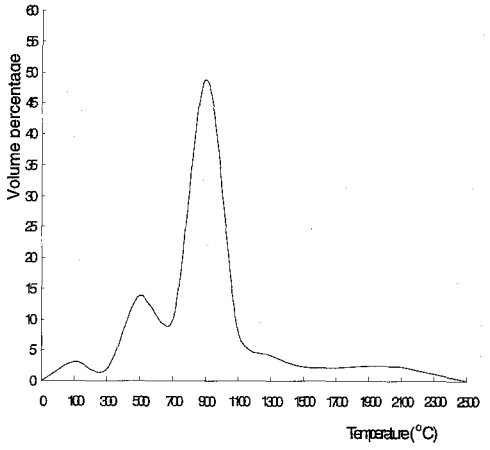

Fig. 8 Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 60°

2차 공기 주입 각도가 증가할수록 입구 부분에서 온도가 점점 낮아져 1차 공기 입구부분의 온도는 20℃에서 30℃사이의 매우 낮은 온도 분포를 나타내었다.

5개의 2차 공기 주입 각도 중 가장 큰 값인 75° 일 때의 온도 분포 곡선을 Fig. 9에 각각 도시하였다. 각도가 증가할수록 1차 공기 입구 온도가 낮아져 결국 입구 경계조건인 섭씨 20℃의 온도 값을 가졌다. 1000℃ 이상 영역은 전체 체적의 24.7%를 차지하였으며 200℃ 이하의 낮은 온도영역이 다른 주입각의 경우와 마찬가지로 주로 공기 입구에 존재하였다. 소각로내의 전체 온도 분포 영역이 넓어짐에 따라 표준편차 값도 커졌다.

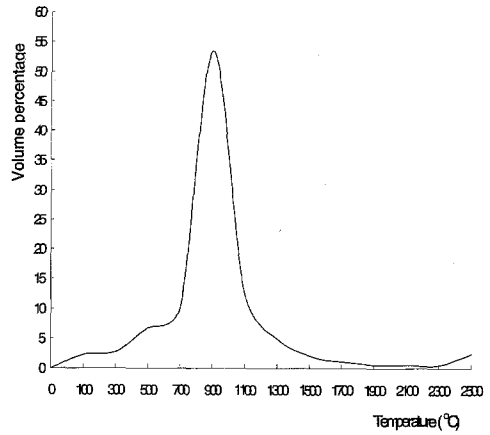

Fig. 9 Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 75°

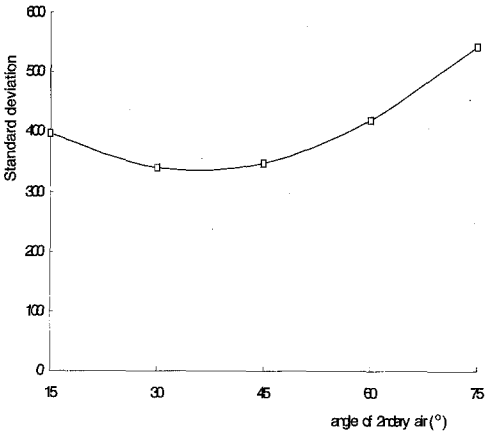

Fig. 10 Variation of standard deviation of temperature with the inlet angle of secondary air

표준 편차가 501.9로 5개의 주입각도 중에서 가장 큰 온도 편차를 나타내었다. 한편 소각로 출구의 온도는 910℃로 주입 각도에 상관없이 일정한 온도값을 나타냈는데 이는 소각로 내부의 벽면을 열손실이 없는 완전 단열벽으로 취급한데서 발생한 것으로 보인다. 2차 연소실의 온도 범위는 780도에서 993℃로 주입각도 60°보다 약간 증가하였다. 결국 주입 각도 75°는 1000℃ 이상의 고온영역이 넓어지고 표준편차와 화염 부근의 온도가 커져 공해 물질의 배출증가가 우려되었다.

Fig. 10은 주입 각도 증가에 따른 온도 표준편차 변화를 나타낸 것이다. Fig. 10을 보면 상대적으로 넓은 온도 영역을 나타내었던 15°와 75°의 표준 편차 값이 다른 주입 각도에 비해 큰 값을

가지는 반면에 비교적 좁은 온도 영역을 보였던 30°와 45°의 경우는 낮은 표준 편차값을 가짐을 알 수 있다. 이 결과로 보아 소각로 내부의 유동 패턴을 제어하는데 중요한 요인중에 하나로 받아들여지고 있는 2차 공기 주입각도가 지나치게 크거나 작은 경우는 온도 분포 균일도에 부정적인 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

소각로 내부의 폐기물 연소 과정에서 생성되는 공해 물질의 배출을 최소화시키기 위해서는 소각로 내부가 적절한 온도 범위 내에서 균일한 온도 분포를 유지해야 한다. 따라서 본 연구에서는 소각능력이 30kg/hr인 특정 소형 소각로를 대상으로 1, 2차 공기 주입 비율을 50대 50으로 하고 2차 공기 주입 각도를 변화시키면서 2차 공기 주입 각도가 온도분포의 균일도에 미치는 영향을 상대적 평가에 의미를 두어 분석하였다. 수치 실험 결과 주입각도에 따른 온도 영역별 체적 백분율은 주입각도가 15°에서 75°로 증가하면서 온도분포의 균일도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 결국 본 논문에서 대상으로 한 소형 소각로의 경우 30°와 45°사이에 온도 표준편차의 최소값이 존재하여 가장 좋은 온도 분포 균일도를 나타내었다.

참고문헌

[1] 이진욱, 박병수, 윤용승, 서정대, 허일상, "상업용 소각로 연소실 성능 예측을 위한 수치 해석 연구," 연소학회 논문집, 제 4권 1호, pp. 141-153, 1999

[2] Stephen M. Hirt, Greg B. Gatenby, Understanding incineration, Chemical Processing, pp. 62-67, 1996,

[3] 박상일, 최경빈, 박영재, 고창복, "소각로 2차 연소실의 유동에 대한 실험적 연구," Energy R&D, Vol. 16, NO. 4, pp. 22-31, 1994

[4] Lee, R., S., "Modular Incinerator Technology for Municipal Waste Treatment, 폐기물 처리 신기술 Proceeding, 현대산업개발, pp. 55-60, 2000

[5] 한인전, 환경화학, 일신사, pp.24, 1994

[6] 김향원, 1997, 중소형 소각로, 겸지사, pp. 71-73, 1994

[7] 최상민, 김성중, 김승기, 유영돈, "소각로 개발 관련 연구" 대한 기계 학회지, 제 34권 제8호, pp. 632- 642, 1994

[8] Fehr, M. and Vaclavinek, "A Cold Model Analysis of Solid Waste Incineration, "International Journal of Energy Research, Vol.16, pp. 277~283, 1992

[9] Nasserzadeh, V., Swithenbank, J. and Jones, B.,"Three-Dimensional Modelling of a Municipal Solid-Waste Incinerator," Journal of the Institute of Energy., Vol. 64, pp. 166-175, 1991

[10] Nasserzadeh, V., Swithenbank, J., Scott, D. and Jones, B., "Design Optimization of a Large Municipal Solid Waste Incinerator," Waste Management., Vol. 11, pp. 249-261, 1991

[11] Ide, Y., Kashiwabara, K., Nakagawa, K., Ilirokawa, M., Roko, K. and Nomura, H., "Numerical Simulation of Flow and Thermal Characteristic in the Municipal Refuse Incineration Furnace," 川崎重工技報, Vol. 117, pp. 79-85, 1993

[12] Kitamura, R., et al., "Secondary Combustion Characteristics of Municipal Waste Incinerator," "R&D" Kobe Steel Engineering Reports, Vol. 43, pp. 79-82, 1993

[13] Seeker, W. R. and Lanier, W. S., "Municipal Waste Combustion Assessment: Combustion Control of Organic Emission," EPA, PB87-206090, 1987

[14] Ravichandran, M., & Gouldin, F.C., "Numerical Simulation of Incinerator Overfire Mixing," Combust. Sci. and Tech., Vol. 85, pp. 165-185, 1992

[15] 김성중, 김승기, 유영돈, 최상민, "폐기 물 소각로의 연소실 설계 고찰, " 한국 폐기물 학회지, 제 11권, 제 4호, pp. 619 ~ 629, 1994

[16] Spalding, D. B., TR100 - A Guide to the PHOENICS Inpu tLanguage, CHAM, pp. 1.1-1.7, 1992

[17] Soon-kee Kim, Dong-hoon Shin, and Sang-min Choi, Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Designs by Flow Simulation, Combustion and Flame, Vol. 106, No. 3, pp. 241-251, 1996

[18] (주)삼호 보일러, 삼호 보일러 소각로 설계 내용

[19] Poliakov, I. and Semin, V.,"An introduction In to the method for implementing Multi-Block Grids and/or Grids with refinements in PHOENICS", J. of Computational Fluid Dynamics and its Applications, Vol 7, pp. 143-172, 1994

[20] Patanka, S. V., Numerical Heat Transfer

and Fluid Flow, Press Roman, pp. 88-90, 1980

[21] Spalding, D. B., TR100 - A Guide to the PHOENICS Input Language, PHOENICS, pp. 2.17-2.22, 1992

[22] 박상일, 최경빈, 박영재, 고창복, "소각로 2차 연소실의 유동에 대한 실험적 연구," Energy R&D, Vol. 16, NO. 4, pp. 22-31, 1994