

2차 공기 주입각이 소각로 내부의 온도 분포 균일도에 미치는 영향

김성준^{*1}, 민인홍^{*2}, 박명호^{*3}, 박민주^{*4}

Effects of the angle of secondary air inlet on the uniformity of temperature distribution inside an incinerator

S. J. Kim, I. H. Min, M. H. Park and M. J. Park

This research is aimed to find out how the inlet angle of secondary air affects the uniformity of temperature distribution inside a small incinerator. A commercial code, PHOENICS, is used to simulate the thermal-flow field of an incinerator. The computational grid system is constructed by Multi-Block technique provided by PHOENICS. Numerical experiments are done with the five different angles of secondary air inlet. The uniformity of temperature distribution is evaluated by checking the standard deviation of temperature distribution in an incinerator. The computational results show that there is the minimum value of standard deviation at the certain angle of secondary air inlet, which means that there is an optimum angle of secondary air inlet that could improve the uniformity of temperature distribution in an incinerator. The optimum angle of secondary air inlet is between 30 degree and 45 degree in this particular case.

Key Words: 소각로(Incinerator), 폐기물(Waste), 온도 균일도(Uniformity of temperature)
2차 공기 주입각(Angle of secondary air inlet)

1. 서론

소각에 의한 폐기물 처리방법은 일본이나 유럽, 싱가포르등과 같이 국토가 좁고 인구 밀도가 높은 국가에서 많이 사용하는 폐기물 처리방법으로 폐기물을 감량화시키고 소각열을 이용하는

효과가 있어 인구밀도가 높은 국내에서도 소각에 의한 처리율을 점차 높이는 방향으로 나아가고 있다. 그러나 소각처리는 공해물질 배출로 인한 환경 오염이라는 심각한 문제점을 가지고 있는 바 공해 물질 배출 저감을 위한 소각로 기술이 그 동안 꾸준히 연구되어 왔으며 지금도 그에 대한 연구와 기술개발은 계속 진행되고 있다. 우리나라의 경우 소각로 설계 및 제작 기술의 대부분이 외국 기술에 의존되어 있으나 외국 쓰레기와는 다르게 수분 함유량이 많고 발열량이 적은 특성을 지니는 국내 쓰레기를 소각처리 하는데 많은 어려움이 있는 것이 사실이다[1].

^{*1} 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부, 교수

^{*2} 강원대학교, 기계메카트로닉스공학과, 박사과정

^{*3} 강원대학교, 시간 강사

^{*4} 강원대학교 기계메카트로닉스공학과, 석사과정

따라서 우리나라 쓰레기 성상에 맞는 소각로 기술의 개발이 절실하나 소형 소각로를 주로 생산하는 중소기업의 경우 연구 개발인력의 부족과 연구 자금의 부족으로 기술개발이 정체되어 있거나 전혀 진행되지 못하는 실정이다.

소각로를 설계하는데 있어서 설계자가 고려해야 할 중요 사항중의 하나는 연소실 내부에 최적의 연소조건이 이루어지도록 하여 배기가스 생성을 최소화하는 것이다. 일반적으로 3T (Time, Temperature, Turbulence)는 소각로를 설계할 때 설계자가 고려해야 하는 기본 설계 조건이며 특별한 고온부이나 저온부 없이 있는 연소실의 균일한 온도분포 유지는 오염 물질 저감에 매우 중요한 요인중의 하나이고 독일에서는 환경법에 연소실의 온도를 850℃ 이상으로 유지하도록 명시하고있다[2, 3]. 따라서 본 연구에서는 3T 가운데 공해물질 생성에 지대한 영향을 미치는 온도 분포에 연구 중심을 두었으며 소각로 내부의 열유동장을 제어하는 중요 인자로 알려져 있는 2차 공기 주입각도[3]가 소각로 내부의 온도분포와 온도분포의 균일도에 미치는 영향을 수치 해석하고 그 결과를 분석하였다. 한편 본 연구에서 수치계산의 편의상 채택한 중요한 가정들은 다음과 같다. 첫째, 소각로 벽을 열손실이 없는 완전 단열 벽으로 가정하였고 둘째로 연소반응을 고려하지 않고 화염을 단순히 열원으로 취급한 것이다. 그리고 셋째는 연소가스의 조성을 고려하지 않고 연소가스를 가열된 공기로 취급한 점등이다. 따라서 본 연구는 온도분포의 절대적 수치값 보다는 상대적 평가에 그 의미를 두어 연구를 수행하였다.

2. 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 소형 소각로를 대상으로 소각로 내부의 온도장을 수치 해석하였다. 시간당 소각 능력은 30kg이고 소각용 공기공급량은 11.57 Nm³/kg이다. 비 압축성 정상상태의 연속방정식과 운동량방정식 그리고 엔탈피 대신에 온도를 종속변수로 하는 에너지방정식을 본 연구의 3차원 열유동현상을 묘사하는 지배방정식으로 사용하였다. 에너지방정식에 열원을 주어 연소에 의한 발열을 묘사 하였고 화학반응은 전혀 고려하

지 않았다.

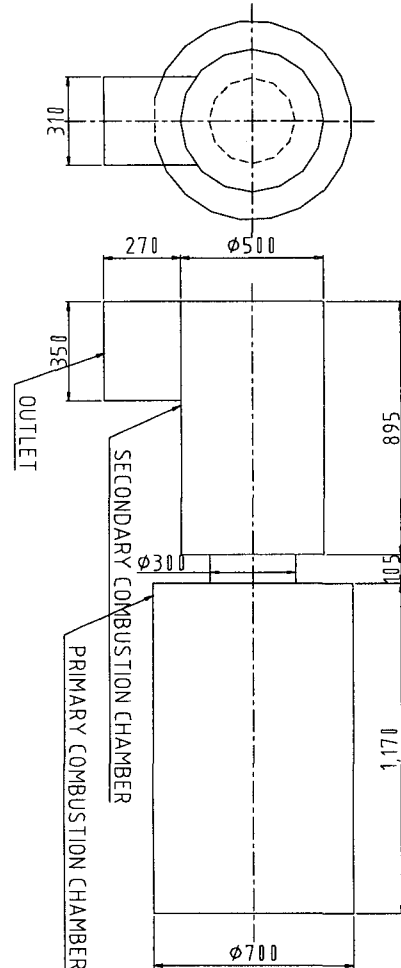


Fig. 1. Dimensions of incinerator

연구 대상인 소형 소각로(Fig. 1)는 수평 화격자식으로 화격자 아래부분에서 공급되는 1차 공기와 위 부분에서 공급하는 2차 공기로 반분하여 연소실에 연소용 공기를 공급하였다. 1차 및 2차 공기 입구에서의 공기 온도는 20도로 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 3개

의 계산 세포에 걸쳐 위치하고 있다. 2차 공기는 2차 공기 입구를 통해 원주방향으로 유입되어 1

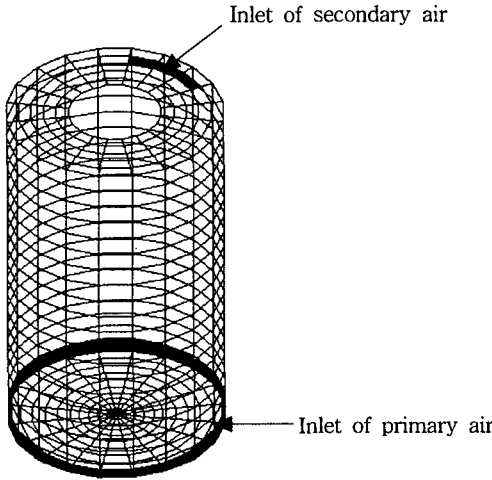


Fig. 2. Locations of 1st and 2nd air inlet

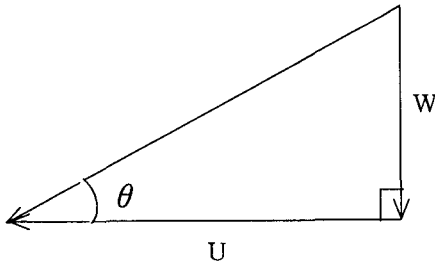


Fig. 3. Velocity components of secondary air

차 연소실에 선회류가 형성된다. 2차 공기의 속도 성분을 Fig. 3에 나타내었으며 W는 소각로의 축 방향 속도 성분으로 1차 연소실 상 단면에 수직하며 U는 원주방향 속도성분이고 θ 는 2차 공기 주입각도로 수평으로부터 측정하였다.

1차 연소실에 공급되는 공기의 양은 주입각도 변화와 관계없이 일정해야하므로 W값은 일정하게 두고 주입각도 변화에 따라 원주방향 속도 성분 값만 변화를 주어 선회류의 정도를 조절하였다. 소각로 내부에 형성되는 화염은 열을 계속

해서 소각로에 공급하는 열원으로 취급하였으며 화학 반응은 고려하지 않았고 Dulong의 식[4]을 사용하여 Table 1[5]의 쓰레기 성상을 대상으로 저위 발열량을 계산하였으며 그 값은 4214

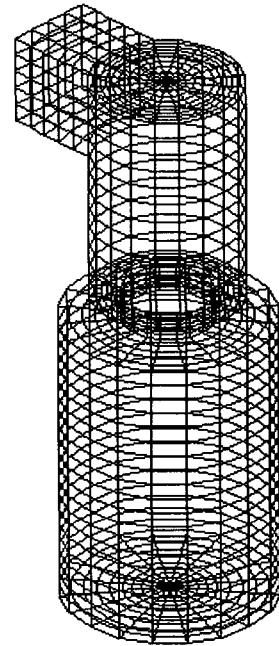


Fig. 4. Oblique view of computational grid system

kcal/kg이었다. 본 연구에서 채택한 완벽한 단열벽 조건이 외벽 열 손실이 있는 실제와 다르기 때문에 이를 고려하여 소각로 출구의 온도가 900도 정도가 되도록 발열량에 곱하는 인자값을 수치실험을 통해 결정하였다. 계산한 이론적 저위발열량에 70%를 곱하여 소각에 의한 발열량으로 하였고 수치해석의 독립변수는 2차 공기 주입각도로 하였으며 종속 변수는 온도 분포와 그 균일도로 하였다. 주입 각도를 15° 간격으로 15° 에서 75° 까지 변화시켜 수치계산을 수행하였다.

3. 수치 해석 방법

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

소각로 내부의 유동장과 온도장을 수치 해석하기 위해서 범용 해석 코드인 PHOENICS[6]를 사용하였다.

수치해석용 격자망 구성은 PHOENICS에서 제공되는 MBFGE(Multi Block grid and Fine Grid Embedding)기법[7]을 사용하여 수행하였다. 계산 격자망 구성을 위해 사용한 블록의 수는 모두 4개이며 총 7000개의 계산세포를 필요로 하였다. 구성된 격자망이 Fig. 4에 도시되어 있으며 하부의 원통부분이 1차 연소실이고 2차 연소실은 상부의 원통부분이며 2차 연소실에 연소가스의 출구가 붙어있다.

지배방정식을 차별화하는 기법으로 계산시간과 수치계산의 안정성 확보를 고려하여 1차 정확도의 Hybrid법을 사용하고 차별식 풀이방법으로 압력장은 홀필드(whole field) 방법을 사용하고 다른 종속변수에 대해서는 슬랩바이스랩(slab by slab) 방법을 적용하였다[8].

본 연구에서 사용한 난류 모델은 1968년에 Harlow와 Nakayama가 제안하고 수많은 실험과 검증은 통하여 그 유용성이 비교적 잘 입증된 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다[9, 10]. 수치 해석의 수렴 조건은 질량 유동량의 1000 분의 1인 질량 잔류 값로 하였고 대개 반복계산횟수 3000에서 수렴 해를 구할 수 있었으며 계산시간은 43000초 정도이었다. 컴퓨터는 펜티엄III(CPU 500MHz)를 사용하였다. 수치해석결과를 온도분포와 온도분포의 균일도 관점에서 분석하였다. 온도분포의 균일도는 표준편차(σ)[11]의 크기

로 확인하였다.

4. 수치계산결과 및 고찰

2차 공기의 주입각을 수치실험의 독립 변수로 하여 주입각이 소각로 내부의 온도분포와 그 균일도에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 5는 2차 공기의 주입 각도가 15도일 때 소각로 내부의 온도영역별 체적 백분율이다. 이 경우는 5개의 주입 각도 중 원주방향 속도성분이 가장 큰 경우로 강력한 선회류가 형성되는 경우이다. 소각로의 저공해특성에 지대한 영향을 미치는 2차 연소실에서의 온도는 880도에서 920도 정도의 온도분포 영역을 보였으며 적절한 연소 가스 온도[12, 13, 14]로 여기고 있는 850도와 1000도 사이는 52.2%이었다. 1000도 이상의 고온지역은 연소실 전체 체적의 20.3%를 차지하였고 주로 1차 연소실의 화염근처에 분포하였다. 200도 이하의 초저온영역은 존재하지 않았으나 1차 및 2차 공기 주입구와 1차 연소실 벽 근처에서 온도가 비교적 낮았다. 온도분포의 표준 편차를 계산하여 본 결과 그 값이 396이었으며 소각로 출구 부분의 온도는 섭씨 910도이었다.

2차 공기의 주입 각도를 30도로 증가시켰을 경우의 소각로 내부의 온도영역별 체적 백분율이 Fig.6에 도시되어 있다. 주입각 15도의 경우보다 원주 방향 속도 성분이 작아진 경우로 온도 분포 영역을 공기 주입각도 15도 경우의 온도 분포 영역과 비교하여 볼 때 최고 온도가 떨어지

고 온도 분포 범위도 좁아졌음을 알 수 있다. 그러나 2차 연소실의 온도분포는 843도에서 975도 정도로 주입각도 15도와 비교할 때 온도 분포 영역이 조금 넓어졌으며 1000도 이상의 고온

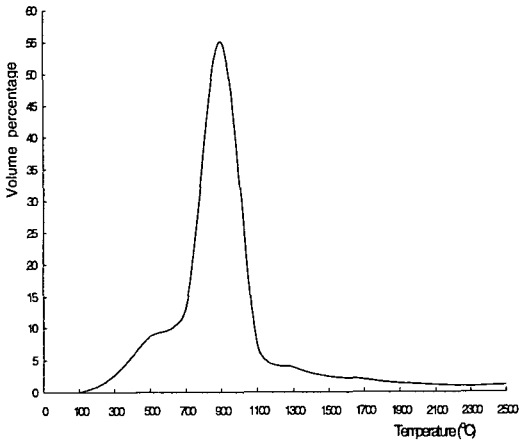


Fig. 5. Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 15 °

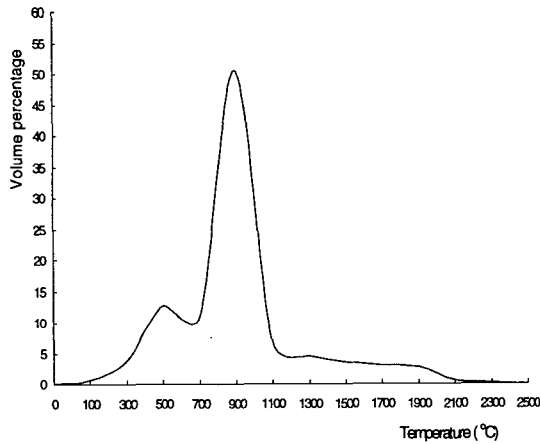


Fig. 6. Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 30 °

영역 체적도 약간 높은 값을 가졌다. 그럼에도 불구하고 최고온도가 대폭 낮아짐에 따라 온도 분포의 균일도는 좋아졌다. 200도 이하의 저온 부근이 전체 체적의 1%를 차지했는데 주로 공기 주입구 근처에 존재하였다. 온도분포의 표준 편차 값은 5개의 주입각도중에서 가장 적은 340이었으며 온도분포의 균일도가 개선되었음을 볼

수 있었다.

2차 공기 주입각이 45도 일 때의 온도영역별 체적 백분율을 Fig. 7에서 볼 수 있다. 온도 분포 영역이 30도의 경우와 유사하나 200이하의

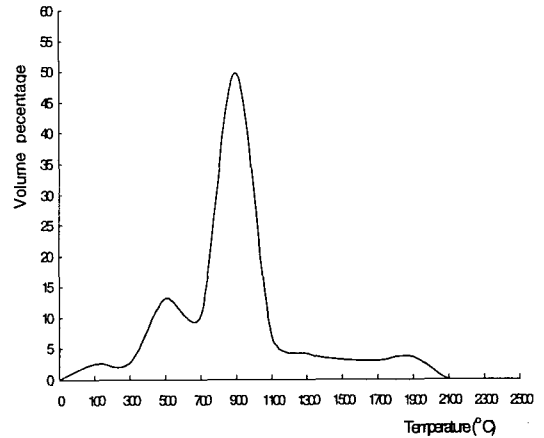


Fig. 7. Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 45 °

저온 부분이 더 존재함을 Fig. 7에서 확인 할 수 있다. 2차 연소실의 온도 분포 영역은 섭씨 800에서 980도에 이르는 분포를 보여 2차공기 주입 각도가 증가할수록 온도 분포 범위가 점점 넓어짐을 알 수 있으나 그 변화량은 크지 않았다. 1000도 이상의 고온영역은 전체 연소실 체적의 21.4%를 차지했다. 섭씨 200도 이하의 낮은 온도영역이 전체 소각로 체적의 3%를 차지해 30도에 비해 3배 가까이 증가하였다. 특히 1차 및 2차 공기 주입구 부분에서 섭씨 100도 이하의 낮은 온도 영역이 있음을 확인할 수 있었다. 온도 분포의 표준 편차값이 349로 주입각도 30도 보다 약간 그 값이 커졌다.

주입 각도가 60도 일 때의 온도영역별 체적 백분율을 Fig. 8에 나타내었다. 소각로 내부의 2차 연소실 온도 분포 범위가 앞의 각도보다 더 넓어진 섭씨 780도에서 990도에 이르는 온도 영역을 관찰할 수 있었다. 1000도 이상의 온도영역이 전체 체적의 22.9%로 증가하였고 200도 이하의 낮은 온도 영역은 전체 체적의 3.11%로 45도보다 약간 증가하였다. 2차 공기 주입 각도가 증가할수록 입구 부분에서 온도가 점점 낮아져 1차 공기 입구부분의 온도는 20도에서 30

도 사이의 매우 낮은 온도 분포를 나타내었다. 표준 편차 값이 420으로 증가하여 전체 로내의 온도분포영역이 다시 넓어짐을 알 수 있었다.

5개의 2차 공기 주입 각 중 가장 큰 값인 75도 일 때의 온도 분포를 Fig. 9에 도시하였다. 각도가 증가할수록 1차 공기 입구 온도가 낮아져 결국 입구 경계조건인 섭씨 20도의 온도 값을 가졌다. 1000도 이상 영역은 전체 체적의 29.9%를 차지하였으며 200도 이하의 낮은 온도영역이 다른 주입각의 경우와 마찬가지로 주로 공기 입구에 존재하였다. 2차 연소실의 온도 범위는 780도에서 993도로 주입각도 60도보다 약간 증가하였다. 소각로내의 전체 온도 분포 영역이 넓어

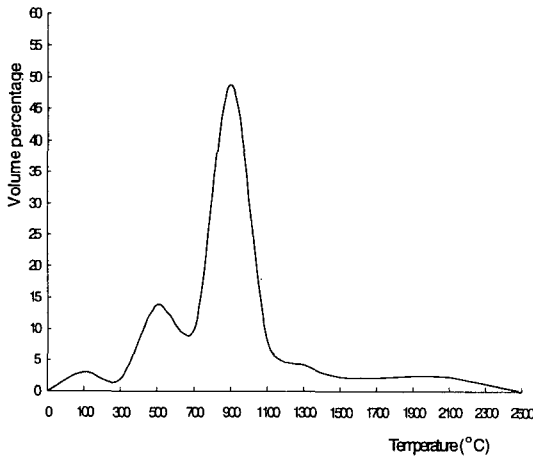


Fig. 8. Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 60 °

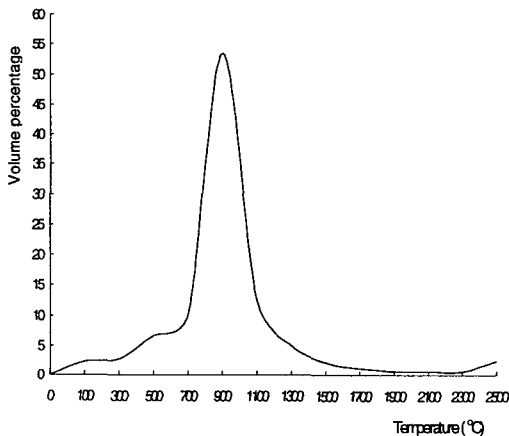


Fig. 9. Volume percentage with temperature range at the inlet angle of 75 °

짐에 따라 표준편차 값도 커졌다. 표준 편차가 543으로 5개의 주입각도 중에서 가장 큰 온도 편차를 나타내었다. 1000도 이상의 고온영역이 보다 넓어져 2차 공기의 주입 각도가 지나치게 클 경우 공해 물질의 배출증가가 우려되었다. 주입 각도 변화에 따른 1000도 이상 영역이 차지하는 소각로 체적 백분율을 Fig. 10에 나타내었다. 주입각도가 45도이상 커지면 고온지역이 급격히 넓어짐을 확인할 수 있었다. 특히 주입 각도 60도부터는 1000도 이상 온도 영역이 차지하는 소각로 체적 비율이 급격히 증가하여

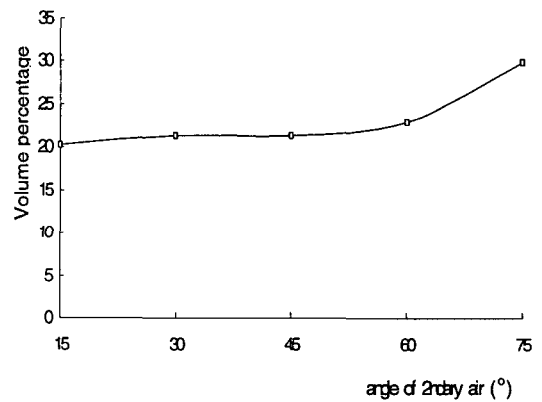


Fig. 10. Volume fraction of the region over 1000°C

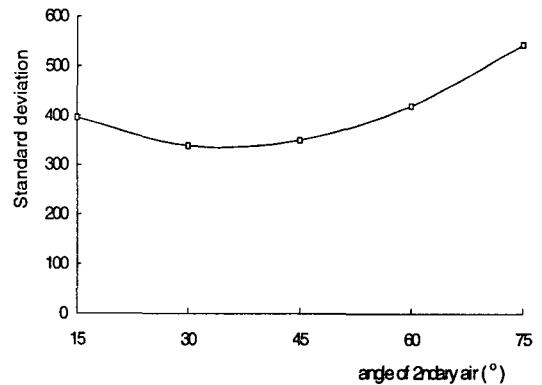


Fig. 11. Variation of standard deviation of temperature with the inlet angle of secondary air

주입 각도 75도일 경우 전체 체적의 거의 30%에 달하였다.

Fig. 11은 주입 각도 증가에 따른 온도 표준 편차 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11을 보면 상대적으로 넓은 온도 영역을 나타내었던 15도와 75도의 표준 편차 값이 다른 주입 각도에 비해 큰 값을 가지는 반면에 비교적 좁은 온도 영역을 보였던 30도와 45도의 경우는 낮은 표준 편차값을 가짐을 알 수 있다. 이 결과로 보아 소각로 내부의 유동 패턴을 제어하는데 중요한 요인중에 하나도 받아들여지고 있는 2차 공기 주입각도가 지나치게 크거나 작은 경우는 온도 분포 균일도에 부정적인 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

폐기물의 연소 과정에서 생성되는 공해 물질의 배출을 최소화시키기 위해서는 소각로 내부의 온도가 적절한 온도 범위 내에서 분포하여야 하며 지나친 저온지역이나 고온지역이 없어야 한다. 이는 온도분포의 균일도가 좋아야 공해물질의 생성을 저감시킬 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 특정한 소형 소각로를 대상으로 1, 2차 공기 주입 비율을 50대 50으로 하고 2차 공기 주입 각도를 변화시키면서 2차 공기 주입각도가 온도분포의 균일도에 미치는 영향을 수치실험을 통해 분석하였다. 수치실험 결과 주입각도가 15도에서 75도로 증가하면서 온도분포의 균일도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였으며 표준 편차값의 최소치가 존재함을 확인할 수 있었다. 본 연구의 대상인 소형 소각로의 경우 온도분포의 균일도가 가장 좋은 즉 온도분포의 표준편차 값이 가장 적은 2차 공기 주입각은 30도 근처에 있었다. 다른 소각로에 대해서도 같은 연구 방법을 도입해 적절한 2차 공기 주입각을 찾아 낼 수 있으며 이는 소각로 설계 및 운전에 큰 도움이 될 것으로 믿어진다.

참고문헌

- [1] 이진욱, 박병수, 윤용승, 서정대, 허일상, "상업용 소각로 연소실 성능 예측을 위한 수치해석 연구" 연소학회 논문집, 제 4권 1호, pp. 141 ~ 153 (1999).
- [2] 최상민, 김성중, 김승기, 유영돈, "소각로 개발 관련 연구" 대한 기계 학회지, 제 34권 제 8호, pp. 632 ~ 642 (1994).
- [3] 김성중, 김승기, 유영돈, 최상민, "폐기물 소각로의 연소실 설계 고찰" 한국 폐기물 학회지, 제 11권, 제 4호, pp. 619 ~ 629 (1994).
- [4] 김향원, "중소형 소각로", 겸지사, pp.71 ~ 73(1997).
- [5] (주) 삼호 보일러, 삼호보일러 소각로 설계 자료
- [6] Spalding, D. B., TR100 - A Guide to the PHOENICS Input Language, CHAM, pp.1.1 ~ 1.7 (1992).
- [7] Poliakov, I. and Semin, V. , "An introduction into 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).
- [8] Spalding, D. B., TR100 - A Guide to the PHOENICS Input Language, PHOENICS, pp. 2.17 ~ 2.22 (1992).
- [9] Harlow, F. H. and Nakayama, P. I., Transport of turbulence energy decay rate LA-3854, Los Alamos Science Lab., U. of California, USA (1968).
- [10] Kim, S. K., Shin, D. H. and Choi, S. M., "Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Designs by Flow Simulation", Combustion and Flame, Vol. 106, NO. 3, pp. 241 ~ 251 (1996).
- [11] Crowe, C., Sommerfeld, M. and Tsuji, Y., Multi Phase Flows with Droplets and Particles, CRC Press, pp. 37 ~ 51(1998).
- [12] 박상일, 최경빈, 박영재, 고창복, "소각로

[1] 이진욱, 박병수, 윤용승, 서정대, 허일상, "상업용 소각로 연소실 성능 예측을 위한 수치해석 연구" 연소학회 논문집, 제 4권

- 2차 연소실의 유동에 대한 실험적 연구”,
Energy R&D, Vol. 16, NO. 4, pp22~31
(1994).
- [13] 김형택, 최상일, 현주수, 박철우, 손웅전,
김영대, 장동순, “미분탄 연소시 공기 역
학적방법에 의한 NOx의 저감”, Energy
R&D, Vol 14, NO. 3, pp. 39 ~
56(1992). (1992).
- [14] Lee, R., S., “Modular Incinerator
Technology for Municipal Waste
Treatment” 폐기물 처리 신기술
Proceeding, 현대산업개발, pp. 55 ~ 60
(2000).