산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제22권 A호, 2002.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 22 A, 2002.

2차 공기 주입 조건 변화에 따른 소형 소각로 내부의 유동장 분석

Analysis of the Gas Flow Field of Primary Combustion Chamber with the Conditions of Secondary Air Injection

최 병 대* 김 성 준**
Choi, Byung-Dae Kim, Sung-Joon

Abstract

This analysis is aimed to find out how the conditions of secondary air injection affects the residence time and the turbulence energy of flue gas and flow field in a small incinerator. A commercial code, PHOENICS, is used to simulate the flow field of an incinerator. The computational grid system is constructed in a cartesian coordinate system In this numerical experiment, an independent numerical variable is the conditions of secondary air injection and dependants are the residence time of flue gas and the mean value of turbulence energy in a primary combustion chamber. The flow field and the distribution of turbulence energy are analysed to evaluate the residence time of flue gas and the turbulence energy The computational results say that the tangential injection of secondary air make the residence time much longer than the radial injection and that the radial injection of secondary make turbulence much stronger than the tangential injection.

키워드 : *2차 공기 주입 조건, 체류 시간, 난류 운동 에너지, 소형 소각로*
Keywords : *conditions of secondary air injection, residence time, turbulence energy, small incinerator,*

1. 서론

일상 생활이나 산업 활동의 결과로 발생하는 여러 종류의 폐기물을 적절히 관리하고 처리하지 않으면 수질오염, 대기 오염 및 토양 오염을 일으켜 환경의 질이 심각하게 훼손된다. 소비생활의 확대로 플라스틱과 같은 포장 폐기물과 종이 사용량 등이 증가하면서 가연성 폐기물이 점차적으로 증가하고 있는 것이 특징이다. 폐기물을 처리하는 방법으로는 크게 재활용, 매립, 소각 그리고 기타 방법으로 나눌 수 있다. 소각에 의한 처리 방법은 폐기물의 감량화와 동시에 소각시 발생하는 열을 이용할 수 있으며 처리 속도가 매우 빠르고 안정적인 장점을 가지고 있다.

따라서 소각은 가연성 도시 쓰레기를 안전하게 처리하는 매우 효율적인 방법이다. 그러나 이 소각 처리에 의해 발생되는 대기 오염 물질이 환경 오염을 일으키게 됨에 따라 이의 저감을 위한 연구가 계속되고 있다. 연소 현상에 의해 발생되는 공해 물질, 그리고 여러가지 물질이 복합된 연소 가스의 방출을 제어하는 장치들이 개발되고는 있지만 근본적인 해결책은 공해 물질 자체를 소멸시키

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 박사과정
** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사

거나 그 생성을 최소화하는 데 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 적절한 소각 처리의 관리와 소각로의 연소 기술 개발이 절실히 필요하다고 하겠다. 그러나 소각로에 대한 연구는 주로 대형 소각로에 집중되어 있어서 소형 소각로에 대한 체계적인 연구도 필요할 것으로 생각된다.

일반적으로 소형 소각로는 100kg/hr 미만에서 25kg/hr 이상의 소각 시설을 말한다. 그 구조는 다양하나 보통 폐기물을 소각하는 1차 연소실과 미연소 가스를 버너를 이용하여 재연소 시키는 2차 연소실, 그리고 연소 배출 가스와 분진(재)을 분리시키는 집진 장치 사이클론으로 나눌 수 있다.[1]

소각로에서 발생하는 공해 물질을 억제하기 위해서는 사전방지, 소각로내에서의 최적연소, 그리고 후처리 등 세 단계로 이루어질 수 있으며[2], 전통적으로 소각로내 최적 연소 조건은 3T, 체류시간(Time), 난류(Turbulence), 온도(Temperature)의 개념으로 표현된다.[3]

실제 소각로내 연소 상황은 매우 복잡하며 이를 모사하여 수치 해석을 하는 과정에서 많은 문제점이 존재할 수 있다.[4] 김등[2]은 연소실에서 일어나는 복잡한 열유동 및 반응 과정에서 유동은 가장 주된 부분이며 연소와 열전달에 의해 상대적으로 큰 영향을 받지 않는 것으로 보고 정량적인 엄밀성은 부족하지만 정성적인 특성을 냉간 유동의 이해로부터 관찰하여 설계의 기초적인 아이디어를 도출해낼 수 있다고 하였다.

따라서 이 논문에서는 연소 과정은 고려하지 않고 연소실 설계와 운전의 중요한 인자인 2차 공기 주입 방식과 주입구 수 그리고 주입 속도가 연소실 내부 유동장 변화에 미치는 영향을 조사하는데 초점을 두고 연구를 진행하였다.

한편 소각로에 대한 설계 및 운전 기준인 환경부의 폐기물관리법 시행규칙[5]에 의하면 소각능력 200kg/hr 미만의 일반 소각 시설에 대해 배출 가스 온도는 800℃ 이상, 연소가스 적정 체류 시간은 0.5초 이상을 요구하고 있다. 이 연구는 3T 중 소각로내에서의 최적 연소에 지대한 영향을 미치는 체류 시간과 난류 운동 에너지의 관점에서 연구를 진행하였으며 이는 소각로 설계 기술 습득을 위해서이다.

2. 소각로 형상 및 경계 조건

이 연구에서 연구 대상으로 하고 있는 소각로는 수평 화격자식으로 소각 능력 30kg/hr의 소형 소각로이다. 이 소각로는 1차 연소실과 2차 연소실로 구성되어 있으며 1차 연소실에서 완전 연소되지 못한 미연 가스를 2차 연소실에서 완전 연소 시키는 구조로 되어있다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 1차 연소실은 원통형 형태로 지름 700mm, 높이 1170mm이며 2차 연소실은 지름 500mm, 높이 895mm로 역시 원통형으로 있다.

1차 연소실과 2차 연소실은 지름 300mm, 높이 105mm의 원통으로 연결되어 있다. 2차 공기 주입구는 1차 연소실 상부에 각 case별로 접선 방향으로 부착되어 있으며 연소 가스 출구는 2차 연소실 상부에 접선 방향으로 부착되어 있다. 1차 공기 주입구는 1차 연소실 밑면에 축방향으로 두께가 없는 2차원 고리 모양으로 위치하고 있다.

연소용 공기량은 11.57Nm^3/kg으로 소각대상 폐기물의 화학적 조성 데이터를[6] 기준으로 하여 이론 연소공기량에다 과잉 공기비 2.4를 곱하여 산출하였다. 과잉 공기비 2.4는 2.0에서 2.5의 범위에서 폐기물 구분에 따라 결정하도록 제안되어 있다.[7] 연소용 공기는 화격자 아래에서 공급되는 1차 공기와 쓰레기 위에서 공급되는 2차 공기로 공기량을 반분하여 공급하였다. 1차 및 2차 공기 입구에서의 공기 온도는 20℃로 하였으며 연소용 1차 공기 입구는 1차 연소실 하단부에서 소각로 축 방향으로 1m/sec의 속도로 공급 되도록 하였다. 2차 공기 입구는 1차 연소실의 측면 상단부에 있으며 각 경우(CASE 1, 2, 3)에 따라 연소 가스 출구쪽과 출구 반대편에서 각각 접선 방향으로 6m/sec와 3m/sec로 공급된다.

2차 주입 공기의 속도는 소각로 폭의 90% 이상의 적절한 침투 거리[8] 확보와 연소실 내부 유동장 변화에 충분한 영향을 줄수 있는 크기로 하였다. 1, 2차 입구에서의 난류 강도는 5%로 하였으며[9] 연소 가스 출구 조건은 압력만을 고려한 대기 압력으로 하였다.

실제 연소 과정에서 유동장에 대한 온도의 영향을 고려하기 위해 소각 대상 쓰레기의 저위 발열량을 계산하고 이것을 열원(Heat source)으로 모사하여 소각로 내부 하단부에 고정 배치하였다. 실제 소각로 벽은 내화 벽돌로 되어 있어 열손실이 존재하지만 완전 단열벽으로 가정하였고 이에 대한 보정을 위하여는 연소 가스 출구 온도가 800℃가 되도록 열원에 보정값 0.7[10] 을 적용하였다. 또한 벽 근처의 점성 효과를 고려하기 위하여 대수(logarithmic) 함수를 사용하였다.

3. 수치 해석 방법

소각로 내부 연소가스 유동을 정상 상태의 비압축성 난류 유동으로 취급하여 연속 방정식, 운동량 방정식 그리고 온도를 종속 변수로 하는 에너지 방정식을 소각로 내부의 3차원 유동 현상을 묘사하는 지배 방정식으로 사용하였다. 소각로 내부

의 유동장을 수치 해석하기 위해서 범용 해석 코드인 PHOENICS 3.3[11]을 사용하였다. 수치 해석용 격자망 구성은 PHOENICS에서 제공되는 VR-Editor를 사용하여 구성하였다. 구성된 계산 격자망은 직각 좌표계를 이용하였으며 x, y, z 방향으로 각각 20x20x60 총 24,000개의 계산 세포를 가지고 있다. 구성된 격자망은 Fig. 2 에 도시되어 있으며 하부의 원통부분이 1차 연소실이고 상부의 원통 부분은 2차 연소실이다. 지배 방정식을 차분화하는 기법으로는 계산 시간과 수치 계산의 안정성 확보를 고려하여 1차 정확도의 Hybrid 법을 사용하고 차분식 풀이 방법으로 압력장은 홀 필드(whole field) 방법을 사용하고 다른 종속 변수에 대해서는 슬랩 바이 슬랩(slab by slab) 방법을 적용하였다.[12]

이 연구에서 사용한 난류 모델은 1968년에 Harlow와 Nakayama가 제안하고 수많은 실험과 검증을 통하여 그 유용성이 비교적 잘 입증된 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였다.[13] 수치 해석의 수렴 조건은 질량 유동량의 1000 분의 1인 질량 잔류값으로 하였으며 펜티엄IV (CPU 1GHz)를 사용하여 수치 계산을 수행하였다. 반복 계산횟수 3000 정도에서 수렴 해를 구할 수 있었으며 계산 시간은 약 6시간이었다.

수치 해석 결과를 관찰하여 2차 공기의 주입 조건이 연소 가스 체류 시간과 난류 운동 에너지에 미치는 영향을 분석하였다. 연소 과정에서 발생하는 각종 연소 가스는 공기로 가정하였다. 또한 연소 가스 체류 시간은 1차 연소실 축 방향 길이를 1차 연소실 내부의 축 방향 속도 평균값으로 나눈 것으로 정의하였다.

Table 1 Definition of each case

	Injection type	Injection velocity (m/sec)	No. of inlet
CASE 1	Tangential	6.0	1
CASE 2	Tangential	6.0	2
CASE 3	Tangential	3.0	2

Table 1은 2차 공기의 주입 속도, 주입구 수를 변화시켜 각 case별로 2차 공기 주입 방법을 달리한 것이다. case 1 과 case 2 는 주입구 수 차이며, case 2 과 case 3은 주입 속도 차이다.

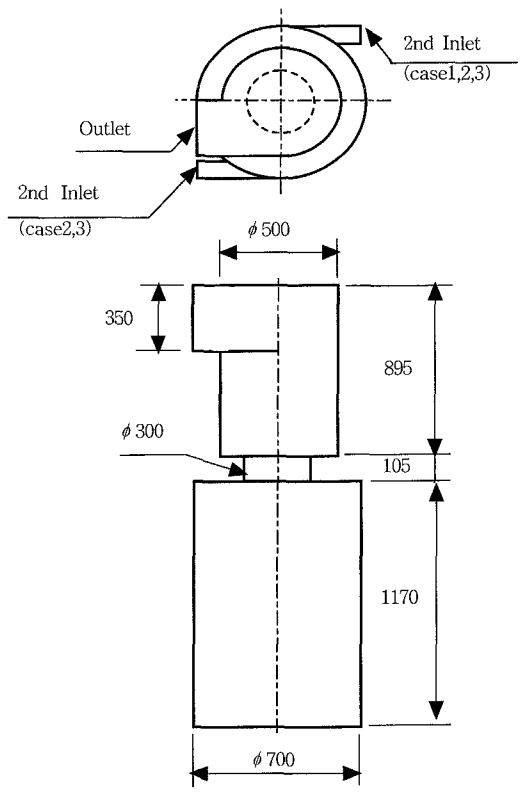


Fig. 1 Dimensions of incinerator (unit:mm)

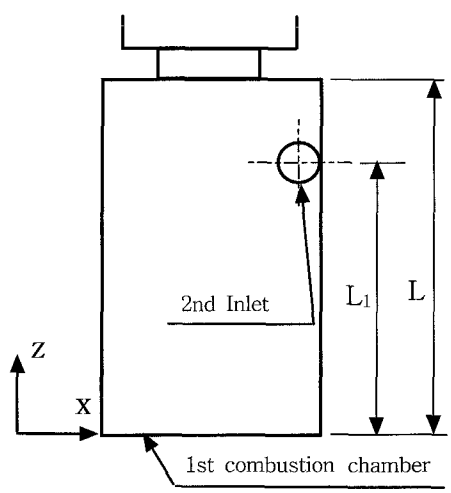


Fig. 2 Positions of secondary air inlet

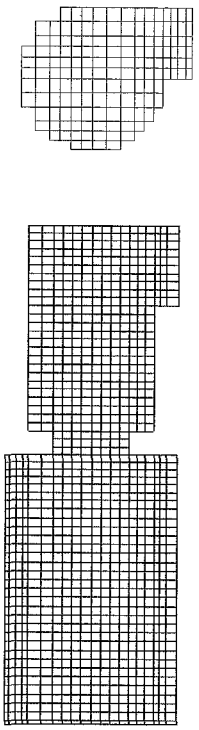


Fig. 3 Computational grid system

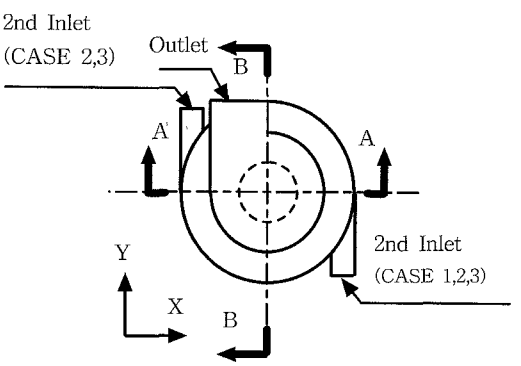


Fig. 4 Definition of A-A and B-B cross section of incinerator

4. 수치 해석 결과 및 고찰

소각로 평면도를 Fig. 4에 나타냈다. 소각로 내부 유동 현상의 특징을 분석하는데 서로 수직 관계에 있는 A-A단면과 B-B 단면을 정의하고 있다. A-A 단면은 2차 공기 입구 및 연소가스 출구와 수직의 단면이고 B-B 단면은 입구와 출구에 평행한 수직 단면이다. 2차 공기 입구 위치가 L_1/L이 0.780일 때 소각로 축 방향과 수직 단면에서의 속도 벡터를 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다.

Fig. 6은 단면 B-B에서 y-z 평면에서의 속도 벡터를 나타내고 있다. Fig. 6 (a)는 2차 공기 주입구가 1개이면서 주입구 속도가 6m/sec 일때의 속도 벡터이다. 접선 방향으로 주입된 2차 공기의 영향을 받아 1차 연소실 상부 좌측과 하부 우측에 재순환 영역이 나타나며 1차 연소실 중심부에 우측 상단부를 향하는 속도 성분이 뚜렷하게 나타나 있다.

(b)와 (c)는 2차 공기의 주입구 수는 2개 씩이나 2차 공기 주입 속도가 각각 6m/sec와 3m/sec로 주입 속도와 주입구 면적이 다른 경우이다. 이 두 경우는 재순환 영역의 위치와 구역등이 매우 유사한 유동 형태를 나타내고 있지만 (b)가 좀더 뚜렷한 유동을 보이고 있다. 이것은 2차 공기 주입량이 일정할 때 2차 공기 주입 속도가 1차 연소실의 유동 형태보다는 연소 가스의 내부 이동 궤적 형성에 더 많은 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다. Fig. 7(a)는 단면 A-A로 x-z 평면에서의 속도 벡터를 나타내고 있다. 2차 공기 주입구를 통과한 제트류의 영향으로 소각로 중심에 우측 상단부를 향하는 속도 성분이 존재하며 재순환 구역의 존재는 뚜렷하지 못하다.

(b)와 (c)는 작은 규모의 재순환 구역이 여러 곳에 존재하며 (b)와 (c)는 B-B 단면에서의 속도 벡터와 같이 유사한 유동 형태를 보이고 있다. 결국 2차 공기 주입구 수 변화에 따라 유동의 형태가 달라지게 되며 재순환 구역의 존재와 소멸로 관찰되고 있다 이러한 소각로내에서의 재순환 영역의 형성은 후연소로서의 역할을 함으로써 체류 시간을 변화시키고 오염 물질의 완전 연소를 유도하는 전략적인 이점을 기대할 수 있다.[14]

Fig. 8은 축방향으로 L1/L=0.780 위치로 x-y 평면에서의 속도 벡터를 나타내고 있다. (a), (b), (c)는 접선 방향으로 주입된 2차 공기가 1차 연소실의 벽을 따라 소각로 내부를 반시계 방향으로 크게 선회하는 유동 형태를 보여주고 있다. (a)가 선회하는 속도 성분이 한 쪽으로 편중되어 있어 속도 구배가 크나 (b), (c)는 양쪽에서 주입되므로 속도 구배가 작게 나타난다.

Fig. 9, 10, 11은 단면 B-B와 A-A, 그리고 L_1/L = 0.780인 X-Y 평면에서 난류 운동 에너지의 분

포를 도시한 것이다. (a)는 접선 방향으로 주입된 2차 공기의 제트류가 1차 연소실 벽을 따라 이동하면서 높은 난류 운동 에너지 구역이 분포하며 (b)는 주입구 수가 늘어남에 따라 연소실 양쪽으로 높게 나타나지만 그 분포 범위가 1차 연소실에 국한되어 있다. (c)는 난류 운동 에너지가 3가지 경우 중 난류 강도면에 있어서 가장 약하게 나타나고 있으며 상대적으로 넓게 분포하고 있다.

Table 2 Results of analysis

	Axial mean velocity (m/sec)	Residence time (sec)	Turbulence energy
CASE 1	0.032	37.7	0.04
CASE 2	0.031	36.6	0.03
CASE 3	0.040	29.3	0.02

이상의 수치 해석 결과를 Table 2에 정리하였다 연소 가스 체류 시간은 주입 속도가 빠를 수록 길게 나타났으며 주입구 수에 따른 변화는 없었다. 따라서 2차 공기의 주입구수를 늘리는 것은 연소 가스의 체류 시간을 늘리기 위한 방법이 될 수 없다. 난류 운동 에너지는 주입 속도가 클수록, 같은 주입 공기량에서는 주입구 수가 적을수록, 즉 주입구 면적이 클수록 큰 값을 갖는 것으로 나타났다

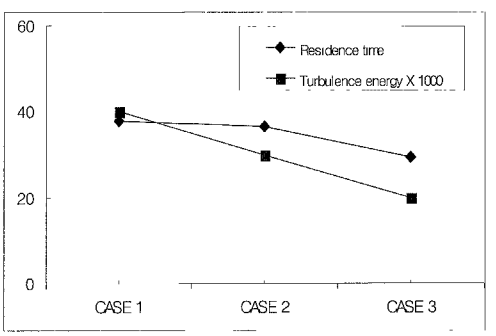
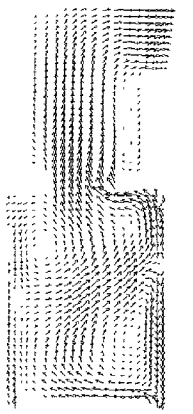
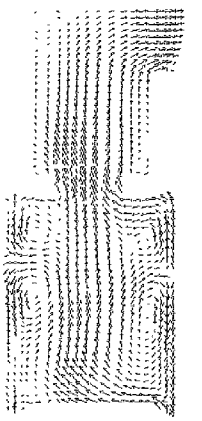


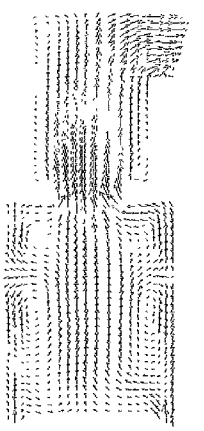
Fig. 5 Result of numerical analysis



(a) Case 1

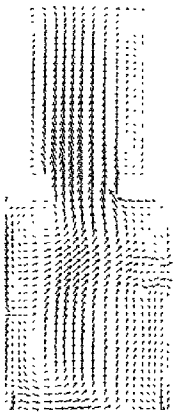


(b) Case 2

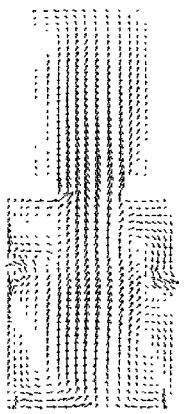


(c) Case 3

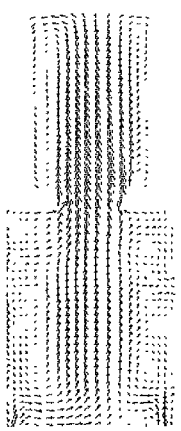
Fig. 6 Velocity vector on B-B plane with the inlet condition



(a) Case 1

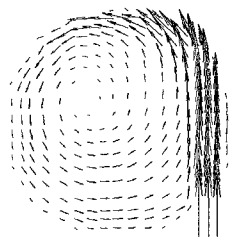


(b) Case 2

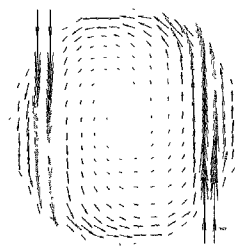


(c) Case 3

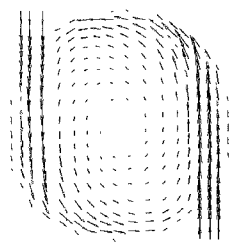
Fig. 7 Velocity vector on A-A plane with the inlet condition



(a) Case 1

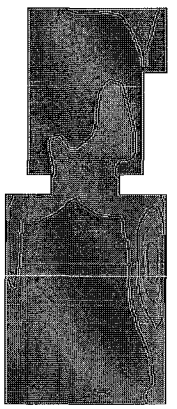


(b) Case 2

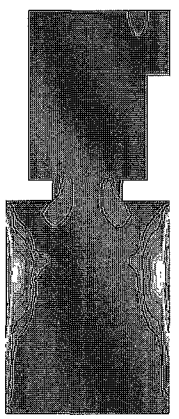


(c) Case 3

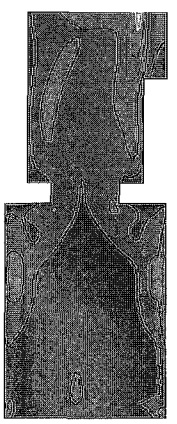
Fig. 8 Velocity vector at $L_1/L=0.780$ on plane with the inlet condition



(a) Case 1

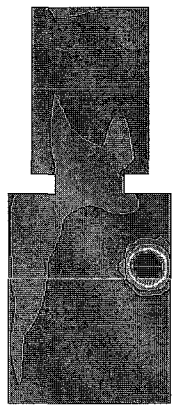


(b) Case 2

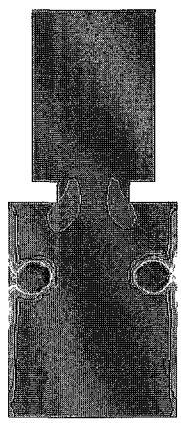


(c) Case 3

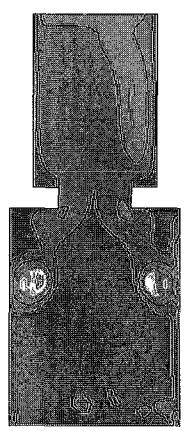
Fig. 9 Distribution of turbulence energy on B-B plane with the inlet condition



(a) Case 1

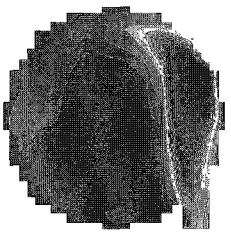


(b) Case 2

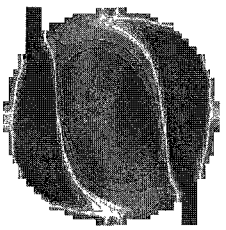


(c) Case 3

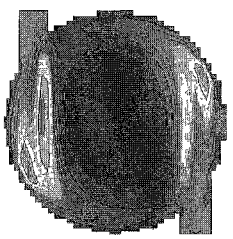
Fig. 10 Distribution of turbulence energy on A-A plane with the inlet condition



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 11 Distribution of turbulence energy at L_1/L=0.780 on plane with the inlet condition

5. 결론

소형 소각로를 이용하여 폐기물을 연소시키는 과정에서 불완전 연소로 인한 대기오염 물질의 방출은 심각한 사회 문제가 되고있다. 따라서 공해물질 배출 저감을 위한 연소실내 연소 가스의 적정 체류 시간 확보와 혼합을 위한 난류 유동은 필수적이다. 이 연구에서는 2차 공기의 주입 조건 변화가 연소실 내부 유동장에 미치는 영향을 분석하였다. 수치 해석의 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째 2차 공기 주입구 수의 변화는 1차 연소실 유동 형태를 바꾸는 중요한 요인이 되나 주입량이 일정할 때 주입 속도 변화는 유동의 형태 변화에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한 연소 가스 체류 시간은 2차 공기 주입 속도가 빠를 수록 길어지는 것으로 조사되었다 이것은 2차 공기 주입으로 인한 강한 선회류의 형성이 연소 가스의 체류 시간 연장에 긍정적인 효과를 미치는 것으로 판단할 수 있다.

둘째 2차 공기 주입구 수에 따른 체류 시간의 변화는 극히 적었으며 이것은 단순히 주입구 수를 늘린다고 해서 연소 가스 체류 시간이 길어지지는 않는 것으로 조사되었다.

셋째 2차 공기 주입량이 일정할 경우 주입구 수가 늘어남에 따라 난류 운동 에너지는 감소하였으며 주입구의 면적과 주입 속도가 클 경우에 그 값이 증가하는 것으로 조사되었다.

따라서 2차 공기 주입 속도가 커질수록 난류 운동 에너지는 증가하며 이것은 미연소 가스의 혼합을 촉진시켜 연소 가스 농도의 균일화 등 연소실 내부 연소 상황을 개선할 수 있을 것으로 조사되었다.

참 고 문 헌

[1] 김종원, 손재익, "소형 고체폐기물 소각로" Energy R&D, Vol. 16, No. 4, 1994

[2] 김승기, 신동훈, 류창국, 최상민, "소각로내 열유동의 계산과 실험" 한국 폐기물 학회지, 제11권, 제4호, pp.545-555, 1994

[3] 김승기, 김성중, 최상민, "소각로 및 폐열회수 보일러 플랜트설계" 대한 기계 학회지, 제 34권, 제12호, pp.940-944, 1994

[4] 김호영, 전철균, 황호영, "스토커형 소각로의 연소특성 및 연소 모델에 관한 연구" 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제5호, pp.627-639, 1998

[5] 환경부 폐기물관리법 시행규칙 중 개정령, 2001

[6] (주) 삼호 보일러, 삼호보일러 소각로 설계 자료, 1998

[7] 環境管理公團,廢棄物燒却處理實務, 環境管理 公團資料集7, 1993

[8] Seeker, W.R. and Lanier,W.S., Municipal Waste Combustion Assessment; Combustion Control of Organic Emission, EPA, 1987

[9] 엄태인, 이금배. "스토커형 소각로의 2차 공기가 연소실의 유동에 미치는 영향에 대한 실험 및 수치 해석적 연구", 대한 환경공학회지, KSEE Vol 19. No. 1, pp.73-88, 1997

[10] 한재현, 정광국, 최진환, 최상민. " 폐기물 소각로 모형의 열간 유동 실험 ", 한국폐기물학회지, 제12권, 제5호 pp.618-625, 1995

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

[12] Spalding, D. B., TR100 - A Guide to the PHOENICS Input Language, CHAM, pp.1.1 -1.7, 1992

[13] Harlow, F. H and Nakayama, P. I., Transport of turbulence energy decay rate LA-3854, Los Alamos Science Lab., U of California, USA, 1968

[14] 박지영, 송은영, 장동순, "큐빅시 스토커 소각로 2차원 비반응 유동장 해석" 한국에너지공학회지, 제2권, 제3호, pp.268-275, 1993