

2차 공기 주입각도에 따른 소각로 내부의 재순환 영역 변화

The change of recirculation zone with the inlet angle of secondary air in an incinerator

김 성 준* 박 민 주** 전 봉 준***
Kim, Sung-Joon Park, Min-Ju Chun, Bong-Jun

Abstract

The purpose of this research is to find out how the inlet angle of secondary air affects the formation of recirculation zone inside a small incinerator. A commercial code, PHOENICS, is used to simulate the flow field of an incinerator. The computational grid system is constructed by Multi-Block technique. Numerical experiments are done with the five different angles of secondary air inlet. The formation of recirculation zone is evaluated by checking velocity fields. The computational results show that recirculation zone is clearly formed from 60 degree of inlet angle and the zone of recirculation is widen as the angle of recirculation is increased to 75°.

키워드 : 소각로, 입구각, 재순환
Keywords : Incinerator, Inlet angle, Recirculation

1. 서론

산업 혁명이후 눈부시게 발전하는 산업과 경제 속도는 쓰레기의 대량화와 다양화라는 문제를 낳았으며 이는 자연의 한계를 넘어선 현재 인류가 안고 있는 가장 큰 과제로 부각되고 있다. 최근 인류는 이산화탄소 및 유기물의 혐기성 분해에서 발생하는 메탄 등에 의한 지구 온난화 현상, 냉매 및 에어로졸 스프레이 등에 의한 오존층 파괴, 엘니뇨 및 라니냐 현상에 의한 대홍수 등 자연 재해로 인하여 이제 더 이상 지구를 방치할 경우 모두 공멸

할 수 있다는 가능성을 경험하고 있다[1][2]. 따라서 이러한 문제 해결 방안을 찾기 위한 대책 마련으로 인류는 고심하고 있으며 이는 앞으로 인간의 생존과 밀접한 관련이 있는 커다란 숙제로 발전되어 질 것이 분명하다.

현재 폐기물을 비롯한 쓰레기는 산업의 발전속도에 발맞추어 그 양과 종류가 엄청나게 늘어나고 있다. 우리나라의 경우 환경부에서는 2001년의 폐기물 발생량이 95년도의 147,591 ton/day 보다 약 50%증가한 220,635 ton/day로 내다보고 있다[3]. 이러한 추세는 앞으로도 계속 이어질 것으로 보여지며 이에 따른 쓰레기 처리문제를 놓고 우리나라 뿐만 아니라 전 세계적으로 다양한 대응책을 찾고 있다. 외국의 경우 일본이나 유럽, 싱가포르 등 우리나라처럼 국토가 좁고 인구 밀도가 높은 나라에서는 폐기물 처리를 소각에 크게 의존하고 있다. 이들 국가에서는 소각 열 회수를 우선으로 하여 감량화시킨 후 위생적으로 매립하는 것을 원칙으로

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사
** 강원대학교 기계메카트로닉스공학과, 석사과정
*** 인천기능대학 자동차학과 조교수

하고 있다. 우리나라 역시 소각처리는 인구 비율에 따른 좁은 땅덩어리를 감안할 때 환경오염의 우려가 있더라도 절대적으로 필요하다. 전체적으로 우리나라도 매립 처리 비율이 크게 낮아지고 재활용이 크게 확대되는 한편 소각 처리율도 점차적으로 증가하는 추세에 있으나 아직도 소각에 의한 처리 방법은 선진국에 비교할 때 매우 미흡하며 이에 대한 쓰레기 처리 방안을 좀 더 늘릴 필요가 있다.

한편, 소각로를 설계하는데 있어서 일반적으로 3T (Time, Temperature, Turbulence)는 설계자가 고려해야 하는 기본 설계 조건으로서 특히 소각로 내부의 재순환 영역의 존재는 온도(Temperature)와 시간(Time)에 관점에서 상당히 중요한 의미를 지닌다. 재순환 영역은 체류 시간 증가 측면에서 볼 때 긍정적으로 보는 경우도 있으나 대체적으로 이 지역은 온도가 낮은 영역으로 다이옥신과 같은 불완전 연소 물질의 생성이 우려된다[4]. 또한 재순환 영역의 형성이 유동의 주류와 재순환 되는 흐름이 교차하는 곳에서 강하고 빠른 유동이 형성되어 출구로 나가는 분진등의 체류시간을 오히려 줄인다는 해석도 제기되고 있다[5][6]. 따라서 본 연구는 소각로 설계의 중요 인자로 알려진 2차 공기 주입각도를 15°에서 75°까지 15°씩 변화시키면서 그에 따른 재순환 영역 형성에 관하여 분석하고자 한다.

2. 지배 방정식 및 경계 조건

2.1 지배방정식(좌표계)

본 연구에서는 소각로 내부의 유동장과 온도장을 모사하기 위해서 SIMPLEST 알고리즘을 적용한 범용 해석 코드인 PHOENICS[7]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 연구에서 사용한 지배방정식은 다음과 같다.

*연속 방정식

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

*운동량 방정식

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

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

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

2.2 난류 모델

난류 모델은 난류유동 해석에 가장 폭넓게 사용되고 있는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. $k-\epsilon$ 모델은 수많은 실험과 검증을 통하여 그 유용성이 입증되어있으며, 실제로 현재 소각로내 열유동장의 수치해석 연구[8]에 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서도 $k-\epsilon$ 모델을 도입하여 사용하였으며 본 논문에서 사용한 지배 방정식은 다음과 같다

*Turbulent kinetic energy equation

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

*Turbulent kinetic energy dissipation equation

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \quad (5)$$

2.3 소각로 형상 및 운전 조건

소각 대상 폐기물에 대한 물리적, 화학적 조건의 데이터[9]가 소각로 설계의 해석 조건을 구하기 위해서 (주)삼호 보일러에 의해 제공되었고, 소각 능력이 30kg/hr인 모델을 기준으로 하였다. 1차 연소실의 규격은 내부 직경 700mm 그리고 높이 1170mm이고 2차 연소실은 내부 직경 500mm, 높이 895mm를 나타내었다. 따라서 본 연구는 연소실의 내부 규격을 수치 해석을 위한 격자망의 치수로써 사용하였다. 1차 공기의 주입구 면적은 0.11m²이고 2차 공기의 주입구 면적은 0.01m²이며 소각로 가스 출구의 면적은 0.11m²이다. Fig. 1은 본 연구 대상인 소각로의 개략적인 설계도를 나타낸 것이다. 시간당 소각능력은 30kg이고 소각용 공기공급량은 11.57 Nm³/kg이다. 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 위치하고 있다. 2차 공기는 2차 공기 입구를 통해 원주

방향으로 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 속도 성분이고 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 계속해서 소각로에 공급하는 열원으로 취급하였으며 화학 반응은 고려하지 않았고 Dulong의 식[10]을 사용하여 Table 1[9]의 쓰레기 성상을 대상으로 저위 발열량을 계산하였으며 그 값은 4214 kcal/kg이었다. 본 연구에서 채택한 완벽한 단열벽 조건이 외벽 열손실이 있는 실제와 다르기 때문에 이를 고려하여 소각로 출구의 온도가 900°C 정도가 되도록 발열량에 곱하는 인자값을 수치실험을 통해 결정하였다. 계산한 이론적 저위발열량에 70%를 곱하여 소각에 의한 발열량으로 하였고 수치해석의 독립변수는 2차 공기 주입각도로 하였다.

따라서 본 연구는 1차 연소실 상단부에 위치한 2차 공기 주입구의 주입 각도를 15° 간격으로 15°에서 75°까지 변화시키고 유동에 따른 재순환 영역의 분포를 관찰하였다.

3. 수치 해석 방법

본 연구는 상용 유체 해석 프로그램인 PHOENICS를 사용하여 소각로를 설계하고 내부 유동 현상을 모사하였다. 수치해석용 격자망 구성은 PHOENICS에서 제공되는 MBFGE (Multi Blockgrid and Fine Grid Embedding) 기법[11]을 사용하여 수행하였다. 계산 격자망 구성을 위해 사용한 블록의 수는 모두 4개이며 총 7000개의 계산 세포를 필요로 하였다. 본 연구에서 사용된 소각로의 계산 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[12]을 사용하고 차분식 풀이방법으로 압력장은 홀필드(whole field) 방법을 사용하고 다른 종속변수에 대해서는 슬랩바이슬랩(slab by slab) 방법을 적용하였다[13].

수치 해석의 수렴 조건은 질량 유동량의 1000분의 1인 질량 잔류값으로 하였고 대개 반복계산 횟수 3000에서 수렴 해를 구할 수 있었으며 계산 시간은 43000초 정도이었다. 컴퓨터는 펜티엄

III(CPU 500MHz)를 사용하였다.

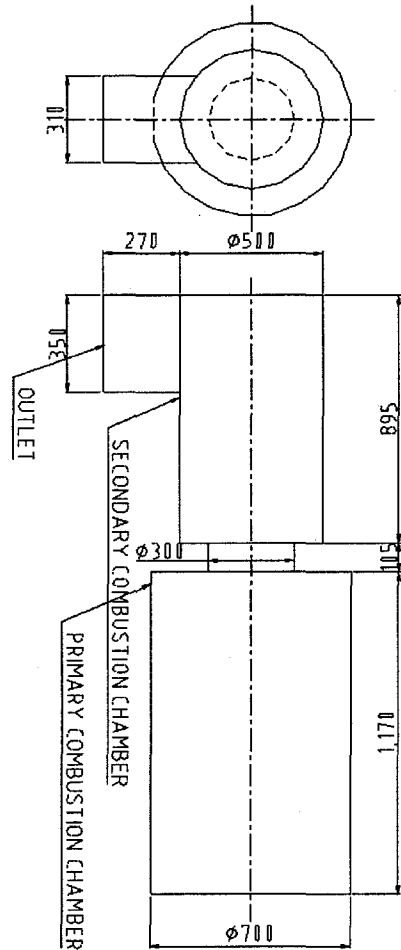


Fig. 1 Dimensions of incinerator

Table 1 Compositions of waste [9]

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

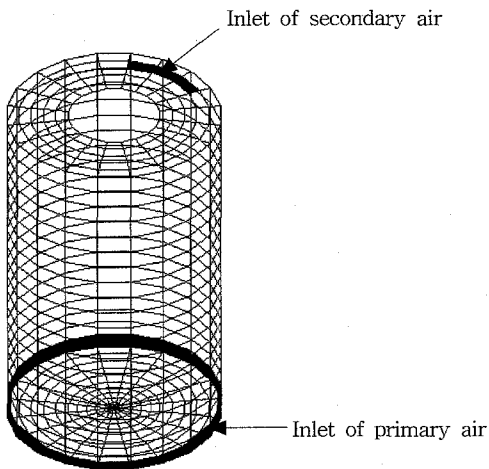


Fig. 2 Locations of 1st and 2nd air inlet

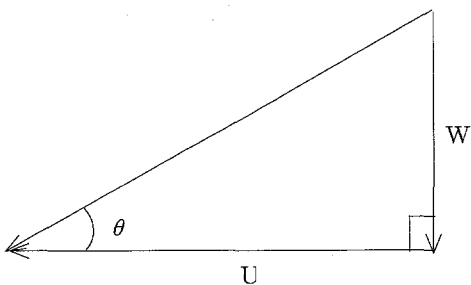


Fig. 3 Velocity components of secondary air

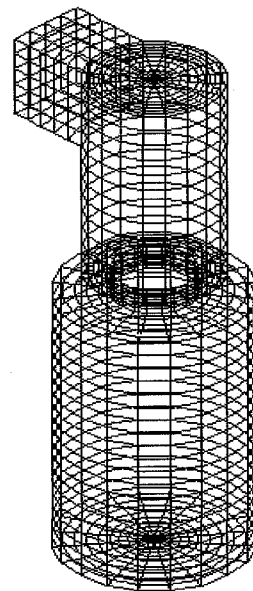


Fig. 4 Oblique view of computational grid system

4. 수치 해석 결과 및 고찰

4.1 재순환 영역 관찰

소각로 내부의 유동 현상은 비대칭적으로 형성하게 된다. 따라서 이러한 3차원적인 소각로 내부의 재순환 영역을 관찰하기 위해서 2개의 단면으로 나누어 유동을 해석하기로 한다. 소각로 상부에서 바라본 X-Y 단면을 Fig. 5에 나타내었는데 Z축

을 나타내는 O점을 중심으로 하여 y방향으로 잘린 단면을 A-A' 단면, x방향으로 잘린 단면을 B-B' 단면으로 정의한다. 그리고 A-A' 단면의 좌우 대칭으로 총 4개의 격자가 출구부로 위치하여 있다.

4.2 A-A' 단면에서의 재순환 영역 관찰

Fig. 6의 (a)에서 (e)는 주입각도 변화에 따른 A-A' 단면에서의 속도장을 재순환 영역 형성 측면에서 관찰한 것이다.

2차 공기의 주입 각도가 15° 일 때 속도 분포를 Fig. 6의 (a)에 나타내었다. 주입각도 15°는 5개의 주입 각도중 원주 방향 속도 성분이 가장 큰 경우이다. 그림 (a)를 살펴보면 최대속도는 9.24m/s이고 최저 속도는 0.24m/s를 나타내고 있으며 대체적으로 빠르게 유동이 진행되고 있다. 2차 연소실 하단부의 양쪽에는 약한 재순환 영역을 형성하고 있으나 1차 연소실 하단부에 U턴형의 유동 형태만 나타날 뿐 재순환 영역은 형성되지 않았다. 이런 관점에서 볼 때 주입 각도 15°는 불완전 연소 물질 생성이 다른 각도에 비해 비교적 적게 생성될 것으로 보인다.

Fig. 6의 (b)는 2차 공기 주입각도가 30°일 때의 속도 분포이다. 앞선 15°와 비교할 때 전체적인 유동 형태는 비슷하고 뚜렷한 재순환 지역도 나타나지 않았으나 최고 속도가 5.75m/s로 감소함을 볼 수 있다. 또한 주입 각도 15°보다 벽을 타고 내려가는 측방향 속도성분이 좀 더 급한 경사각을 나타내었다.

주입각도 45°일 때의 속도 분포를 (c)에 나타내었다. 그림에서 보면 최저속도는 0.357m/s이고

최고 속도는 4.39m/s로 주입 각도가 증가할수록 최고 속도가 감소함을 알 수 있다. 그러나 내부 유동 형태는 크게 변화하지 않았고 U턴 형태의 유동 분포가 나타났을 뿐 아직까지 뚜렷한 재순환 영역은 관찰되지 않았다.

Fig. 6의 (d)를 보면 주입 각도 60°일 때에 1차 연소실 왼쪽 벽 근처 중간지점에서 재순환 영역이 관찰되었다. 이 지역에서 온도는 300°C에서 700°C 사이의 비교적 저온 지역으로 다이옥신이나 일산화탄소 같은 불완전 연소 물질이 생성되기 적합한 온도 조건이다. 또한 2차 연소실 하단부에 발생한 재순환 영역도 오른쪽 부분에서 조금 더 확대된 것을 볼 수 있다. 최저 속도는 0.026m/s이고 최고 속도는 3.77m/s로 주입 각도가 증가할수록 속도가 점점 감소하고 있다.

Fig. 6의 (e)는 5개 주입 각도 중 가장 큰 값인 75°일때의 속도 분포를 나타낸 것이다. 최저 속도는 0.0367m/s이고 최고 속도는 3.63m/s로 가장 적은 속도값을 나타내었다. 주입각도 60°부터 관찰되었던 1차 연소실 하부의 재순환 영역은 좀더 확장되어 1차 연소실 유동 형태는 S자 곡선을 그리고 있다. 또한 2차 연소실 하단부 양쪽에는 아주 약한 재순환 영역을 관찰할 수 있는데 이는 5개의 주입 각에 공통적으로 나타나는 현상으로 목 부분에서 2차 연소실로 유동이 빠져 나갈때 돌연 확대로 인한 유동의 변화로 볼 수 있다. 그러나 주입 각도 60°부터는 2차 연소실 오른쪽 하단 부분의 재순환 영역이 조금씩 확대하는 모습을 볼 수 있다. 전체적으로 주입 각도 75°일 때 소각로 내부에서 크고 넓은 재순환 영역이 관찰되는 것으로 보아 불완전 물질의 생성이 우려된다.

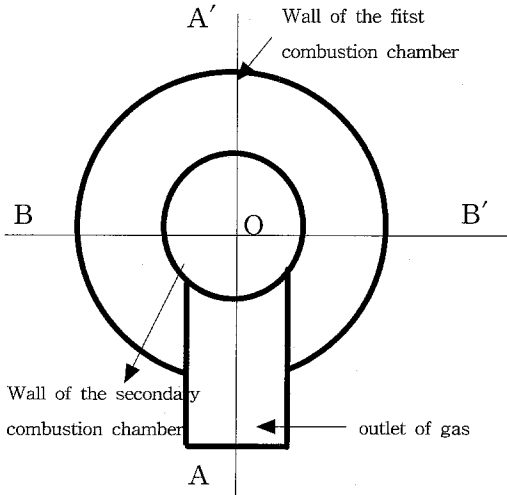


Fig. 5 Top view of incinerator

4.3 B-B' 단면에서의 재순환 영역 관찰

Fig. 7의 (a)에서 (e)는 B-B' 단면에서의 주입 각도에 따른 속도 분포를 재순환 영역 형성 측면에서 관찰한 것이다.

Fig. 7의 (a)를 보면 15°일 때 1차 연소실의 2차 공기 주입구 부분과 1차연소실 왼쪽 하단부에 A-A' 단면에서 볼 수 없었던 재순환 영역을 볼 수 있다. 이 영역은 공기 입구 근처에서 하강하는 공기와 위로 올라오는 공기가 서로 만나서 형성되는 유동의 형태로 보여진다. 최저 속도는 0.151m/s이고 최고 속도는 6.25m/s이다. 한편 A-A' 단면에 나타났던 2차 연소실 양쪽 하단부에 발생한 약한 재순환 영역은 B-B' 단면에서도 보여지고 있다.

2차 공기 주입 각도가 30°일 때의 속도 분포를 (b)에 나타내었다. 앞선 15°의 유동 형태와 거의 비슷하며 재순환 영역에도 큰 변화는 없었다. 2차 공기 주입 각도 30°의 최고속도는 4.08m/s이고 최저 속도는 0.28m/s로 속도가 감소하였다.

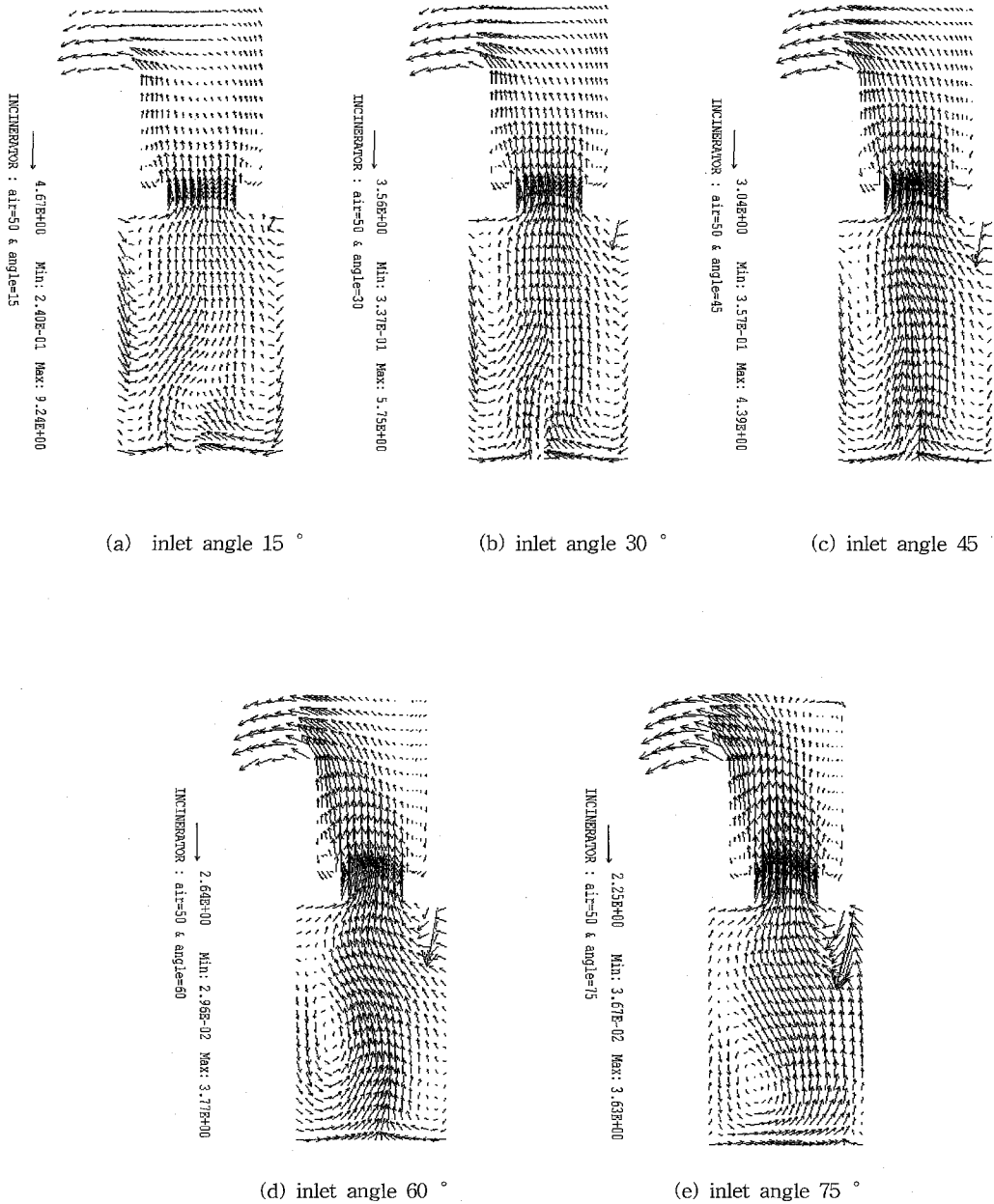


Fig. 6 Velocity vector on A-A' plane with the inlet angle of secondary air

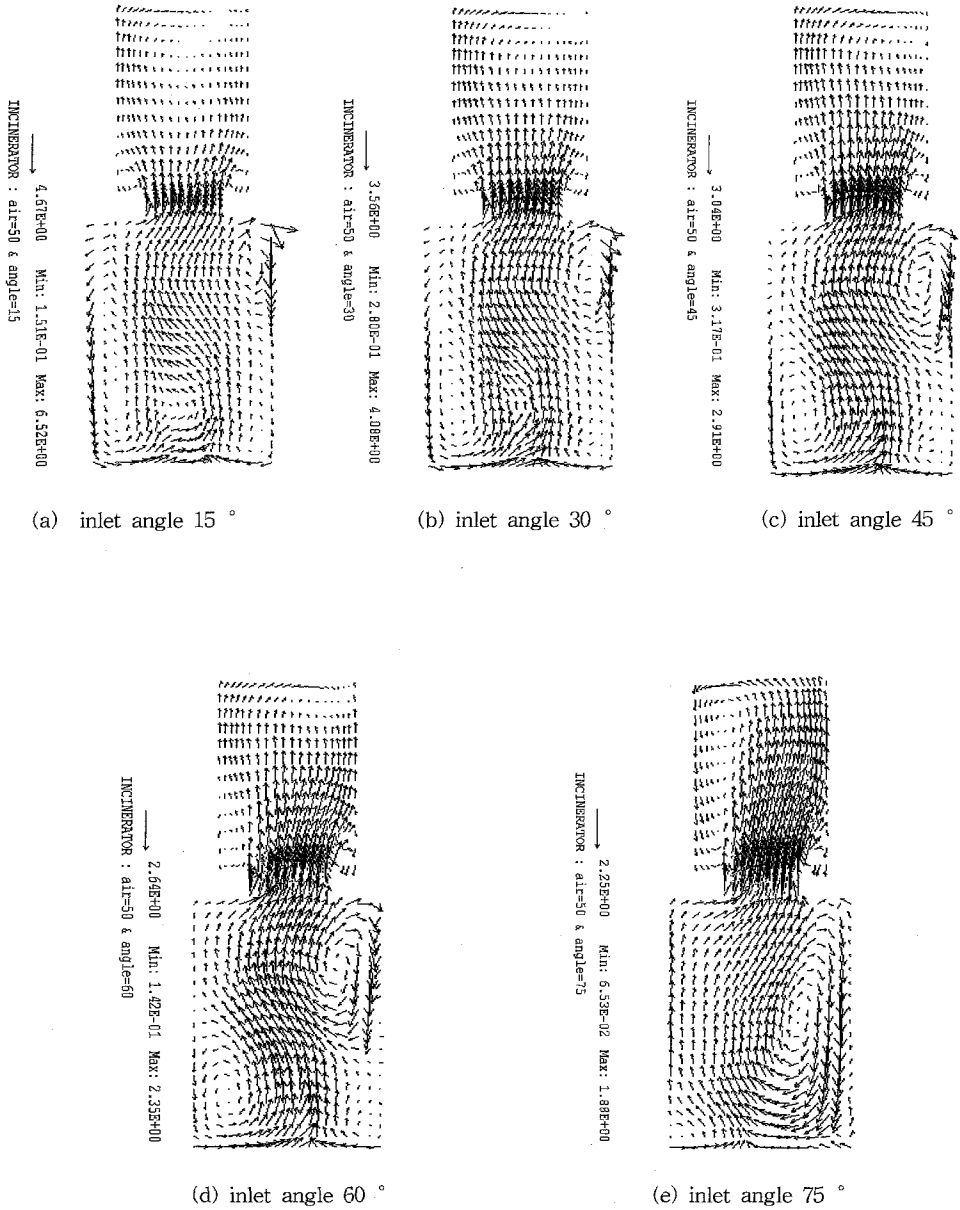


Fig. 7 Velocity vector on B-B' plane with the inlet angle of secondary air

Fig. 7의 (c)는 주입각도 45°일 때의 속도 분포이다. 1차 연소실 하단부에 발생한 재순환 영역이 조금 더 확장되었으나 앞선 유동의 형태와는 크게 달라지지 않았다. 최저 속도는 0.317m/s이고 최고 속도는 2.91m/s로 주입각도 증가에 따라 속도는 점점 감소함을 알 수 있다.

Fig. 7의 (d)는 주입각도 60°일 때의 속도 분포를 나타낸 것이다. 최저 속도는 0.142m/s이고 최고 속도는 2.35m/s로 속도가 더욱 더 감소하였다. 재순환 영역은 주입각도 45°와 비교할 때 비슷하게 분포하나 2차 공기 주입구 부분에서 조금 더 확장된 모습을 볼 수 있다.

Fig. 7의 (e)에서 주입각도 75°일 때의 속도 분포를 살펴보면 앞선 주입각들과 크게 다른 유동 형태를 관찰 할 수 있다. 앞선 주입각들은 2차 공기 주입구 부분과 1차연소실 왼쪽 하단부 부분에서 2개의 재순환 영역이 관찰되었으나 주입각도 75°는 1차 연소실 화염과 오른쪽 벽사이 중간쯤에 하나의 크고 넓은 재순환 영역이 관찰되었다. 또한 뚜렷한 재순환 영역을 볼 수 없었던 2차 연소실 출구부분에도 큰 재순환 영역이 관찰되었다. 2차 연소실에서 나타난 재 순환영역은 불완전 연소 물질의 생성이 크게 우려되는 부분이다. 최고 속도와 최저 속도는 5개의 주입 각도 중에서 최소값을 나타내었다.

5 결론

소각로 내부에서 발생하는 재순환 영역은 다이옥신이나 일산화탄소와 같은 불완전 연소 물질이 생성되기 쉬운 지역으로 이를 제어할 수 있는 적절한 유동 패턴은 공해 물질 억제 측면에서 중요한 의미를 지닌다. 본 연구는 소각능력이 30kg/hr인 소형 소각로를 대상으로 2차 공기 주입 각도의 변화에 따른 소각로 내부의 재순환 영역을 관찰하고자 수치실험을 수행하였다. 본 연구 결과 2차 공기 주입각이 증가할수록 소각로 내부의 축방향 속도 성분은 크게 감소하여 체류시간 증가라는 측면에서 보았을 때는 긍정적으로 보여졌다. 하지만 대체적으로 주입각도가 증가할수록 재순환 영역이 점점 넓고 뚜렷하게 나타났으며 특히 주입각도 75°일 때 재순환 영역은 1, 2차 연소실에 걸쳐 크고 넓게 분포함을 관찰 할 수 있었다. 따라서 지나치게 큰 주입 각도는 불완전 연소물질이 생성되기 쉬운 내부 유동형태로 바람직한 유동 패턴을 위한 적절한 주입각이 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] Swithenbank J. and Nasserzadeh, "Co-incineration. New Development and Trends," European Commission Workshop on the Co-incineration of Waste ISPRA, pp.1-15, 1997
- [2] 엄태인, 장동순, "스토커형 소각로에서 도시 폐기물 소각 과정에 대한 수치해석," 한국 폐기물 학회지 Vol.16, NO4, pp.378-385, 1999
- [3] 김찬수, "국내 소각시설의 운영 실태," 환경보전 pp.2-8, 1997, 10, 10
- [4] 엄태인, 이금배, "스토커형 소각로의 2차공기가 연소실에 유동에 미치는 영향에 대한 실험 및 수치 해석적 연구" Journal of Korea Society of Environmental Engineering Vol. 19, NO. 1 pp.1-15, 1997
- [5] 박지영, 송은영, 장동순, "큐백市 스토커소각로 2차원 非反應 流動場 수치해석" 한국 에너지 공학회지, 제 2권 제 3호 pp.268-275, 1993
- [6] 김성중, 김승기, 유영돈, 최상민, "폐기물소각로의 연소실 설계 고찰," 한국 폐기물 학회지, 제 11권, 제 4호, pp.619 ~ 629, 1994
- [7] Spalding, D. B., TR100 - A Guide to the PHOENICS InputLanguage, CHAM, pp.1.1-1.7, 1992
- [8] Soonkee Kim, Donghoon Shin, and Sangmin Choi, Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Designs by Flow Simulation, Combustion and Flame, vol. 106, No. 3, pp.241-251, 1996
- [9] (주)삼호 보일러, 삼호 보일러 소각로 설계 내용
- [10] 김향원, "중소형 소각로", 겸지사, pp.71-73, 1997
- [11] 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
- [12] Patanka, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Press Roman, pp.88-90, 1980
- [13] Spalding, D. B., TR100 - A Guide to the PHOENICS Input Language, PHOENICS, pp.2.17-2.22, 1992