

가스보일러 연소실 공기분배판의 기하학적 형상에 따른 유동특성 해석

김재중*, 손영갑*, 장석원*, 유동수*

Flow Characteristic Analysis in Accordance with Geometrical Modification of Air Distribution Plate in Gasboiler Combustion Chamber

Jae-Jung Kim, Young-Gap Son, Seog-Weon Chang and Dong-Su Ryu

Key Words: Gasboiler(가스보일러), Geometrical Modification(기하학적 형상 변화),
Air Distribution Plate(공기분배판), Combustion Chamber(연소실)

Abstract

This paper reports a numerical flow characteristic analysis in gas boiler combustion chamber. The numerical results with simplification and assumptions were found within 30% of the experiment. A lot of geometrical modification has been invested in attempt to obtain the uniform flow in the combustion chamber exit. As a result, the velocity magnitude of the combustion chamber is relate with the hole size in air distribution plate. The velocity uniformity of the combustion chamber is relate with the number of holes and location in air distribution plate.

1. 서 론

보일러는 크게 산업용 보일러와 가정용 보일러로 구분할 수 있으며 산업용 보일러는 주로 폐기물 소각로나 화력발전용으로 사용되고 있고 가정용 보일러는 일반 가정에서 난방 및 온수공급용으로 많이 사용되고 있다.

보일러 내부의 유동특성을 알수 있는 방법은 열·유체유동 수치해석이나 유동의 가시화 실험을 통하여 얻어질 수 있으며, 최근 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입어 급격하게 발달하고 있는 전산 유체역학적 수치해석기법의 도입으로 비교적 신속하게 유동을 가시화 할 수 있으므로 간이 실험

모델의 제작과 실험등에 따른 시간과 자원의 낭비를 줄일 수 있다.

지금까지의 보일러에 관련된 연구들을 살펴보면 주로 산업용 보일러에 대한 수치해석적 연구가 대부분이며 가정용 가스보일러에 대한 연구는 미진한 실정이다^{(1),(2)}. 그래서 본 연구에서는 가정용 Gasboiler 연소실 내부의 유동특성을 수치해석을 통하여 해석하고자 한다.

본 연구에서 해석하고자 하는 Gasboiler 연소실을 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 연소실은 공기분배판, 버너(Burner), 매니폴드(Manifolder)등으로 구성되어 있다. 공기분배판에는 직경 3mm의 수많은 원형 hole들이 일정규칙을 가지면서 위치하고 있으며 버너의 개수는 13개이다. 연소실에서 작동유체(공기)의 이동경로는 급기 Fan에서 공급된 공기가 공기분배판의 수많은 원형 hole($\phi 3$)을 통해서 버너를 따라서 위쪽으로 흘러나간다.

* 대우전자(주) 품질경영연구소

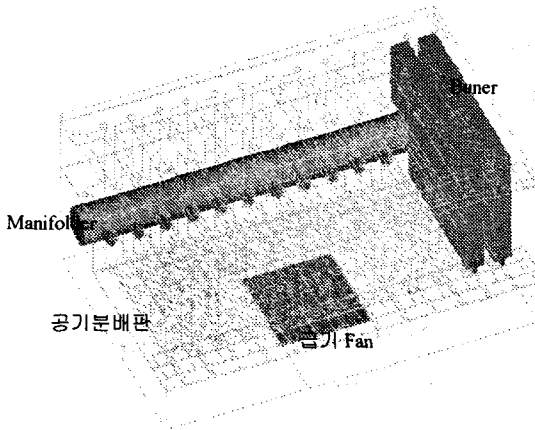


Fig. 1 Schematic of typical combustion chamber of gas boiler

Gasboiler의 작동원리는 간단하게 급기 Fan에서 공급되어 공기분배판을 통해 13개의 버너사이로 흐르는 공기와 매니폴드를 통하여 버너로 주입된 가스가 버너 출구에서 혼합되어 연소가 일어나는 구조로 되어 있다.

본 연구에서는 Gasboiler 연소실내 공기분배판의 형상을 변화시켜 그에 따른 유동 특성의 변화를 파악하고 이를 이용하여 최적의 유동특성, 즉 연소실 출구면의 전영역에서 균일한 속도분포를 갖는 연소실 공기분배판의 최적형상 설계를 위한 방향을 제시하고자 한다.

2. 연소실 해석을 위한 수치적 모델

2.1 지배방정식

본 연구에서 적용한 Gasboiler 연소실내에서의 유동 현상을 기술하는 정상상태의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동량방정식 그리고 난류운동에너지 소산을 방정식이다.

연속방정식

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

운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right\} + \rho g_i \beta (T - T_m) \end{aligned} \quad (2)$$

난류운동량에너지방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \\ &+ G_k + G_b + \rho \epsilon \end{aligned} \quad (3)$$

난류운동량에너지 소산을 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} \\ &+ C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

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

$$G_k = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$G_b = -\beta g_i \frac{\mu_t}{\rho \sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (7)$$

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_3 = 0.09 \quad (8)$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 0.9, \quad \sigma_t = 0.85 \quad (9)$$

식 (1) ~ 식 (9)에서의 기호 선정은 일반적인 교과서에서의 예를 따랐다. 식 (7)에서 σ_t 는 온도에 대한 난류 Prandtl 수이다.

2.2 경계조건

본 연구에서 Gasboiler 연소실내부의 유동현상을 해석하기 위하여 사용된 가정 및 경계조건은 다음과 같다.

- (1) 연소실내로 공기를 공급하는 Fan부분을 Fan의 모델링을 대신하여 그 위치에서 25개의 영역으로 나누어 실험에서 측정된 압력으로 대체하였다.

- (2) 연소실에서 연소과정은 없이 공기의 유동만 고려하였다.
- (3) 버너로의 공기 및 가스의 유입은 없는 것으로 간주하였다.

본 연구에서는 Gasboiler 연소실내 유동분포를 해석하기 위하여 열·유체유동 해석 프로그램인 FLUENT 5.1를 이용하였다.⁽³⁾ 이 프로그램은 완전 암시기법(fully implicit scheme)을 사용한 유한체적법코드로서 속도 등의 벡터량과 압력, 온도 등의 스칼라량의 존재 위치가 서로 다른 엇갈린 격자계를 사용한다. 운동량 방정식의 압력장을 처리하기 위해서 SIMPLE를 이용하였다. 또한 전체영역을 x, y 및 z방향으로 총 300000개의 작은 제어체적으로 분할하였다.

반복계산시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 아래에 정의된 잉여치(Residual) R값이 조사되었으며, 각 종속변수에 대하여 잉여치값이 10^{-4} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다.

$$R = \sum_{all \ domain} |\sum a_{nb} + b - a_p \phi_p| \quad (10)$$

여기서 ϕ , a 및 b 는 각각 본 연구에서의 종속변수, 이산화방정식의 계수 및 생성항을 나타내고 하첨자 p 와 nb 는 각각 계산제어체적과 인접제어체적의 격자점⁽⁴⁾을 나타낸다.

본 계산에서는 수렴조건을 만족하기 위하여 RAM 320byte, Pentium III 455Hz PC에서 2000여 회의 반복계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기존 공기분배판을 갖는 연소실의 유동특성

Gasboiler 연소실의 유동특성을 파악하기 위하여 연소실 출구에서의 x-y단면의 속도분포를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 최고속도는 양쪽 외곽부에서 3.6m/s, 최소속도는 중앙부에서 0.7m/s로 나타났으며 약 3m/s정도의 불균일한

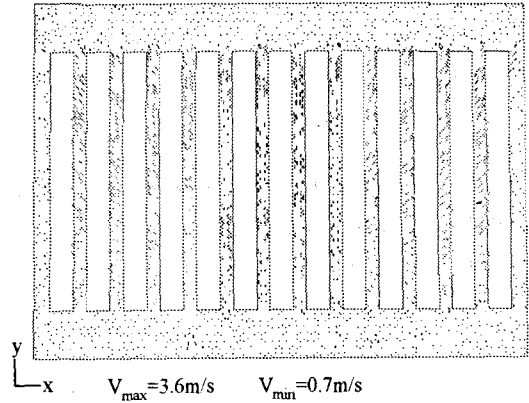


Fig. 2 Velocity distribution of combustion chamber exit (Ø3)

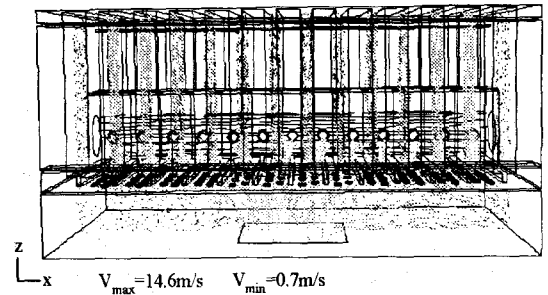


Fig. 3 Velocity distribution of combustion chamber (Ø3)

속도분포를 보였다. 이는 공기분배판의 중앙부에 위치한 hole의 갯수가 외곽부에 위치한 hole의 갯수보다 상대적으로 적기때문인 것으로 사료된다. 아울러 출구면 최외곽부에서 속도가 정지되어 있는것은 출구면에서 5mm정도 아래에 위치한 버너를 지지하는 slot의 방해에 의한 것으로 사료된다.

급기 Fan에서 연소실 출구면까지의 유동특성을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 공기분배판을 통과하는 공기의 최대속도는 중앙부 hole에서 최대 14.6m/s로 나타났으며 외곽부 hole에서는 9.8m/s 정도로 균일한 분포를 나타내었다. 또한 공기분배판 아래의 유동특성을 살펴보면 급기 Fan에서 공급된 공기가 공기분배판의 유동방해에 의해 왼쪽부분에서 재순환영역(recirculation)이 발생되었다. 아울러 공기분배판을 통과한 공기는 버너벽면을 따라서 출구면으로 원활하게 흐르는 것을

알수 있다.

3.2 기존 공기분배판에서 확장된 크기의 hole($\Phi 4$)을 갖는 연소실의 유동특성

기존 공기분배판을 갖는 연소실의 해석결과 공기분배판 아랫부분에서 공기의 재순환영역이 발생하였으므로 이를 해소시키기 위해 hole의 크기를 $\Phi 4$ 로 확장하여 해석을 수행하였다.

확장 hole($\Phi 4$)의 유동특성을 파악하기 위하여 연소실 출구에서의 x-y 단면의 속도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 최고속도는 양쪽 외곽부에서 4.9m/s, 최소속도는 중앙부에서 0.7m/s로 나타났으며 약 4m/s 정도의 불균일한 속도분포를 보였으며 이는 공기분배판 hole의 직경이 확대되면 출구면에서의 속도가 약 1m/s 정도 커짐을 알수 있다. 그러므로 hole의 크기는 출구면의 속도에 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다. 급기 Fan에서 연소실 출구면까지의 유동특성을 Fig. 5에서 살펴보면 공기분배판 아래 왼쪽부분에서 재순환영역의 크기가 작아졌음을 확인 할 수 있다. 또한 공기분배판을 통과하는 공기의 유동특성은 기존 연소실의 유동특성과 유사하게 나타났다.

3.3 기존 공기분배판에서 hole의 갯수가 추가된 연소실의 유동특성

기존 공기분배판을 갖는 연소실의 해석결과 hole의 갯수가 작은 중앙부에서는 속도가 느리고 hole의 갯수가 중앙부보다 상대적으로 많은 외곽부의 속도가 빠른 이유로 중앙부에서 적은 갯수의 hole에 의해 작은 유량에 기인한 것으로 판단되어 기존 공기분배판의 중앙부에 hole의 갯수를 24개를 추가하여 해석을 수행하였다.

Hole의 갯수가 24개 추가된 연소실의 유동특성을 파악하기 위하여 연소실 출구에서의 x-y 단면의 속도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 출구면에서의 최고속도 및 최소속도는 각각 3.6m/s 및 1.4m/s로 기존 연소실 출구면의 속도분포와 비교하면 외곽부의 속도는 변화가 없으나 중앙부에서의 속도가 2배 빨라진 것을 알 수 있다.

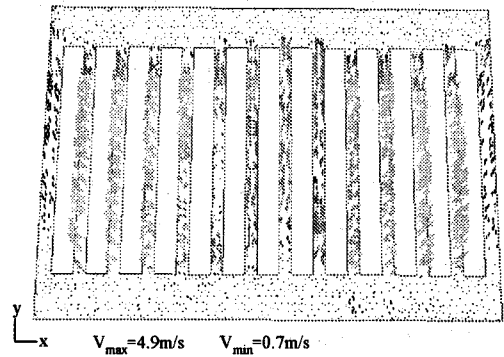


Fig. 4 Velocity distribution of combustion chamber exit ($\Phi 4$)

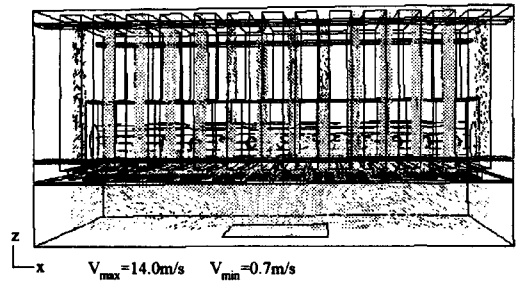


Fig. 5 Velocity distribution of combustion chamber ($\Phi 4$)

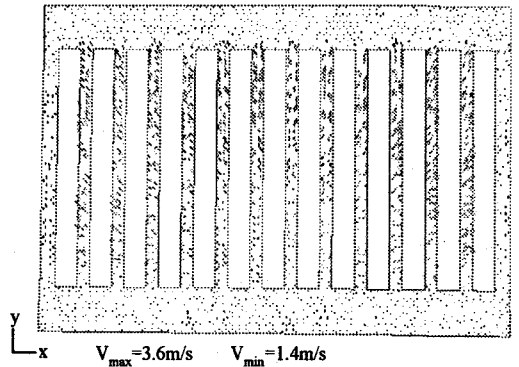


Fig. 6 Velocity distribution of combustion chamber exit with added hole($\Phi 3$)

급기 Fan에서 연소실 출구면까지의 유동특성을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 연소실 중앙부분에서 공기분배판을 통과하여 버너사이로 올라가는 공기의 유량이 증가하였음을 볼수 있다. 아울러 공기분배판의 유동저항이 적어 재순환영역은 거의 보이지 않는다.

3.4 기존 공기분배판에서 확장된 크기의

hole($\Phi 4$) 및 hole의 갯수가 추가된 연소실의 유동특성

3.3절의 해석결과에 의해 공기분배판을 통해 올라가는 속도의 크기가 유량에 비례하는 경향이 나타났기 때문에 기존 공기분배판에서 hole의 크기를 $\Phi 4$ 로 확장하고 공기분배판의 중앙부에 hole의 갯수를 24개를 추가하여 해석을 수행하였다.

확장된 크기의 hole($\Phi 4$) 및 hole의 갯수가 24개 추가된 연소실의 유동특성을 파악하기 위하여 연소실 출구에서의 x-y 단면의 속도분포를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 출구면에서의 최고속도 및 최소속도는 각각 4.3m/s 및 2.2m/s로 기존 연소실 출구면의 속도분포와 비교하면 외곽부는 속도는 0.6m/s, 중앙부에서는 1.5m/s정도 속도가 빨리진 것을 알 수 있다.

급기 Fan에서 연소실 출구면까지의 유동특성을 Fig. 9에서 살펴보면 연소실 중앙부분에서 공기분배판을 통과하여 버너사이로 올라가는 공기의 유량이 증가하였음을 볼 수 있다.

3.5 최적형상 유동특성

이상에서 각 부분의 형상 변화에 따른 유동의 특성을 살펴보았다. 따라서 이를 이용하여 각 부분의 형상 변화를 조합하여 최적의 형상 도출에 이용할 필요가 있다.

우선 공기분배판의 중앙부분에는 확장된 크기의 hole($\Phi 4$)이 총 54개를 가지며 양쪽 외곽부의 hole($\Phi 3$)은 총 120개를 가지는 형상이다.

연소실 출구에서의 x-y 단면의 속도분포를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 출구면에서의 최고속도 및 최소속도는 각각 3.0m/s 및 2.2m/s로서 속도분포가 매우 균일해졌음을 알 수 있다.

급기 Fan에서 연소실 출구면까지의 유동특성을 Fig. 11에서 살펴보면 연소실 중앙부분에서 공기분배판을 통과하여 버너사이로 올라가는 공기의 유동이 전영역에서 거의 일정함을 볼 수 있다.

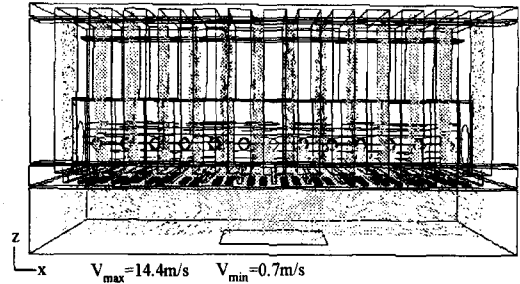


Fig. 7 Velocity distribution of combustion chamber with added hole($\Phi 3$)

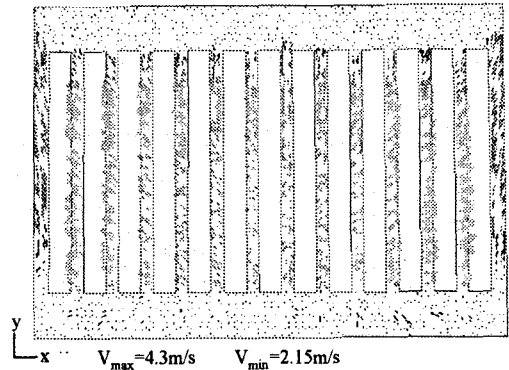


Fig. 8 Velocity distribution of combustion chamber exit with added hole($\Phi 4$)

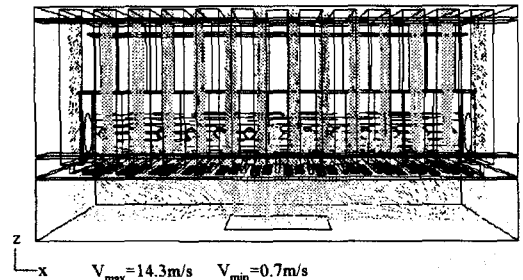


Fig. 9 Velocity distribution of combustion chamber with added hole($\Phi 4$)

4. 결론

본 연구에서는 공기분배판의 형상이 연소실 유동에 미치는 영향을 고찰하였다. 연소실에서 요구되는 유동의 특징은 연소실 출구에서는 균일한 속도분포를 가지는 유동이다.

본 연구를 통하여 연소실의 성능향상에 유리한

참고문헌

- (1) 김성배, 이진욱, 김현진, 허일상, 1999, "폐기물 소각로 연소실의 기하학적 형상에 따른 유동 특성 해석", 대한기계학회 추계학술대회논문집B, pp. 536~540.
- (2) 이병은, 류제욱, 박성진, 이채수, 1999, "복합 배열 회수보일러용 유동조절판 설계", 대한기계학회 열공학부문 추계학술대회논문집, pp. 41~46.
- (3) Fluent Inc., 1998, "Fluent 5.1 User's Guide", Fluent Inc.
- (4) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, DC.

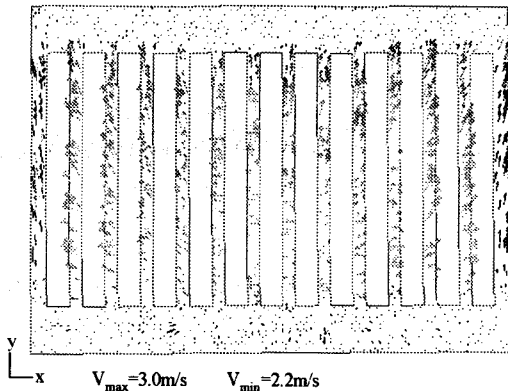


Fig. 10 Velocity distribution of combustion chamber exit with combined hole ($\Phi 3$, $\Phi 4$).

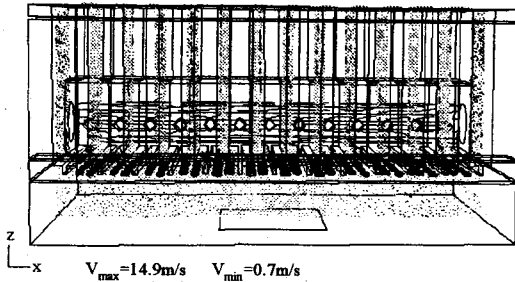


Fig. 11 Velocity distribution of combustion chamber with combined hole ($\Phi 3$, $\Phi 4$).

형상과 그 유동의 특징을 다음과 같이 얻어낼 수 있었다.

- (1) 공기분배판 hole의 크기는 연소실 출구에서의 속도의 크기에 관련이 있으며 hole의 크기가 $\Phi 3$ 에서 $\Phi 4$ 로 증가함에 따라 속도가 최대 36% 증가하였다.
- (2) 공기분배판의 hole의 위치 및 갯수는 연소실 출구에서의 속도분포의 균일성과 관계가 있으며 공기분배판 중앙부에 24개의 hole이 추가시 속도 분포의 균일성이 향상되었다.
- (3) 출구면에서의 공기속도분포의 균일성은 공기분배판의 외곽부의 hole들은 기존 공기분배판 형상을 유지시키고 중앙부의 hole들은 크기를 $\Phi 3$ 에서 $\Phi 4$ 로 증가시키고 24개의 hole을 추가시켜서 얻을 수 있었다.