

# 전치 가이드 베인 배치 및 형상에 따른 보일러 입구 온도분포의 수치해석 연구

이 수 윤, 신 승 원\*

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

## Numerical Simulation of Duct Flow about Shape and Arrangement of Inlet Guide Vane to Increase the Temperature Uniformity

Su Yun Lee, Seungwon Shin\*

**ABSTRACT:** Diverging channel from gas burner exit to the inlet section of Heat Recovery Steam Generator (HRSG) has been re-designed for 1 MW steam supply and power generation system. Three different test geometries have been chosen for the numerical simulation. The existing design for 300 kW HRSG system (CASE B) has been improved by geometry and position changes of inlet guide vanes along with gas velocity entrance angle at the diverging channel inlet (CASE C). Both cases has been compared with the case where hot combustion gas is directly injected without any guide vanes (CASE A). Improved design shows overall uniform velocity and temperature distribution compared to existing design.

**Key words:** Numerical Simulation(수치해석), Inlet Guide Vane(전치 가이드 베인), Duct flow (덕트 유동), HRSG(열회수 보일러), Temperature Uniformity(온도 균일성)

### 기 호 설 명

### 상첨자

- U : 유입 배기가스의 유속 [m/s]
- R : 덕트 입구의 반지름 [m]
- S : 질량유량의 무차원수

\* : 무차원 변수

### 1. 서 론

### 그리스 문자

- $\theta$  : 각도 [°]
- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

열병합발전 시스템은 하나의 에너지원으로 전력과 열을 동시에 생산, 이용하는 종합에너지 시스템이며, 그 중에서도 소형 열병합발전 시스템은 통상 발전용량이 10 MW 이하의 가스엔진이나 터빈을 사용하는 시스템을 일컫는다. 기존에 300 kW급 가스엔진 열병합발전 시스템의 설계가 이루어졌고, 그와 더불어 1 MW급 가스엔진 시스템 설계의 필요성이 대두되었다.

1 MW급 가스엔진 열병합발전 시스템은 이전

† Corresponding author  
Tel.: +82-2-320-3038; fax: +82-2-322-7003  
E-mail address: sshin@hongik.ac.kr

의 300 kW급에 비하여 용량이 3배 정도 증가했기 때문에 이전 설계자료를 그대로 적용하기는 힘들며, 따라서 증가한 용량에 따른 최적 설계가 필요하다.

열회수 보일러 입구에 유입되는 배기가스의 온도 균일성(Temperature uniformity)은 고온의 배기가스(Exhaust gas)와 저온의 열 흡수원(Heat sink)사이에서 전달되는 열의 열전달 특성에 큰 영향을 미치게 되며 이러한 온도 균일성은 속도 균일성에 크게 의존한다. 하지만 실제 열회수 보일러 입구에서 배기가스의 온도는 균일하지 않은데, 그 이유 중의 하나로 연소실의 출구 면적에 비하여 보일러의 입구 면적이 더 넓기 때문에 그 사이에 확장유로를 가지는 덕트(Duct)를 설치하게 되는데, 이로 인하여 면적이 확장되는 부분에서의 유체 유동은 박리(Separation)현상을 동반하여 온도의 균일성을 파괴하고, 에너지의 손실을 초래하기 때문이다.

이와 같은 급확대 유동에서의 박리현상을 최소화하여 에너지의 손실을 줄이고, 온도의 균일성을 유지하기 위해 덕트의 입구에 가이드 베인을 설치하게 되는데, 이를 전치 가이드 베인(Inlet Guide Vane)이라고 한다. 따라서 균일한 온도 분포를 얻기 위한 즉, 균일한 유속을 얻기 위한 가이드 베인 최적 배치는 중요한 설계요소 중의 하나가 된다.

전치 가이드 베인의 경우, 이미 여러 유체 기계에 적용되어 있으므로 그에 관련된 다양한 논문들을 찾을 수 있으나 대부분 특정한 유체 장치에의 적용만을 목적으로 하였다<sup>(1-4)</sup>.

본 연구에서는 유체유동 해석도구인 FLUENT를 이용하여 1 MW급 열병합 발전 시스템에서 선형 확장 유로를 가지는 덕트의 출구를 통과하는 유체의 온도 균일성을 향상시키기 위한 전치 가이드 베인의 최적 배치 및 형상을 찾아보도록 한다.

## 2. 수치해석 형상 및 방법

### 2.1 Simulation Geometry

우선 본 연구에서는 연소실 출구에서 보일러 입구로의 배기가스 유동을 해석하기 위하여 기본적으로 배기가스가 공급될 연소실 출구, 선형 확

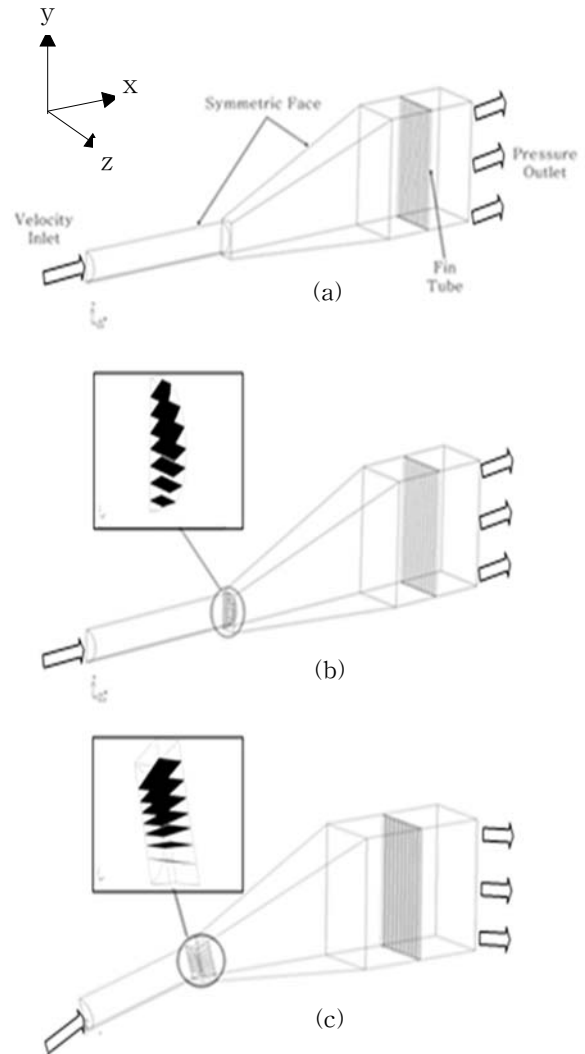


Fig. 1 Testing geometry (a) Without guide vane (Case A) (b) Previous design (Case B) (c) Improved design(Case C)

장유로를 가지는 덕트, 보일러 입구에서 열 흡수원의 역할을 할 핀튜브(Fin tube), Backflow가 발생하지 않을 정도의 충분히 긴 출구 영역을 고려하였다. 덕트의 원형 입구 직경은 0.254 m, 정사각형 출구 한번의 길이는 1 m, 덕트 입구와 연결되어 있는 윗면의 각도를 약 30°로 두어 설계하였다.

수치해석을 이용하여 전치 가이드 베인의 형상과 배치의 적합성을 파악하기 위하여 총 3개의 서로 다른 모델을 정하고, 각각의 모델별로 케이스 번호를 설정하였다. (Fig. 1)

Case A는 기본 형태로 전치 가이드 베인이 설치되지 않은 경우를 나타내며. Case B는 기존의

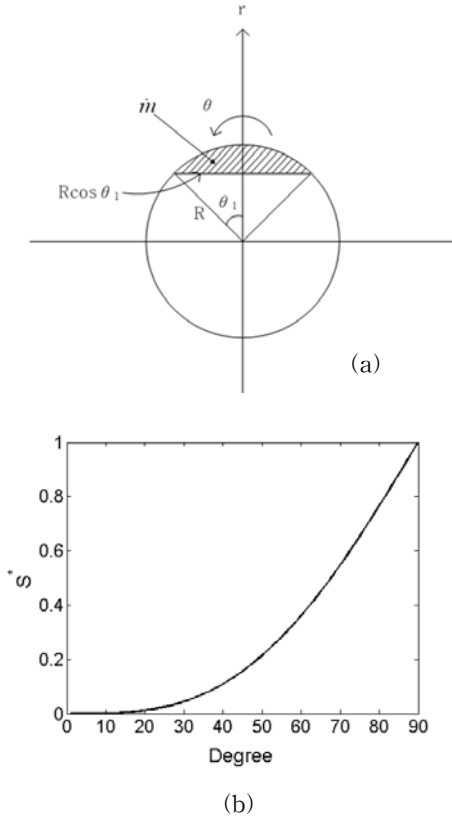


Fig. 2 Dividing mass fraction of circular pipe cross section (a) calculated mass fraction area (b) mass fraction vs angle

300 kW급 열병합 발전 시스템에서의 덕트 입구에 사용되었던 전치 가이드 베인 형상을 나타낸다. 이 경우 원형 덕트의 끝부분이 선형 확장되는 사각형 덕트 입구쪽으로 돌출되어 있고, 원형파이프 내부에 가이드 베인이 설치되어 있다. 가이드 베인의 각도는 실험에 의해 설정되었고, Fig. 1(b)에서 보여지듯 위쪽으로 갈수록 가이드 베인의 각도가 높아져 상당한 노즐 효과가 나타날 것으로 예상된다.

Case C에서는 Case A의 연소실 출구의 방향을 조정하여 덕트로 유입되는 배기가스의 방향과 유동이 확장되는 영역의 방향이 갖는 각도를 줄이도록 덕트 입구 영역을 재설계 하였다. 덕트 입구에서 가이드 베인에 의해서 나뉘어지는 배기가스의 질량유량을 일정하게 하도록 가이드 베인을 적절하게 배치하였다. 그리고 Case B에서 발생하는 노즐효과를 효과적으로 조절하기 위해 원형 입구가 아닌 덕트의 사각 입구 부분에 가이

드 베인을 설치하였다.

완전 발달한 난류 유동에서의 원형 입구에 대하여 면적을 높이 방향으로 8개의 동일한 질량유량 영역을 나누고 그에 해당하는 위치에 가이드 베인의 시작점을 설치하도록 하였다. 완전 발달된 난류 유동의 속도 분포를 식 (1)과 같이 가정하면

$$\frac{u}{V} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} \quad (1)$$

Fig. 2에서와 같이 원형 파이프관의 위쪽 끝부터 거리  $R\cos(\theta_1)$ 까지의 빗금 친 면적으로 흐르는 총 질량유량은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\dot{m} = \rho \int \int 2\pi r u(r) dr d\theta \quad (2)$$

식 (2)에 식 (1)을 대입하고 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{m} = \rho \int_0^{\theta_1} \left[ \int_{\frac{R\cos\theta_1}{\cos\theta}}^R 2\pi r U \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} dr \right] d\theta \quad (3)$$

위의 식을  $\theta$ 에 대하여 다시 정리하고 총 질량유량으로 무차원화 하면 다음과 같다.

$$S^* = \frac{7}{60} \int_0^{\theta_1} \left[ \left(1 - \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta}\right)^{8/7} \left(8 \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta} - 7\right) \right] d\theta \quad (4)$$

식 (2)를 사용하여 가이드 베인의 시작점을 설정하고, 각도는 출구영역에서 위와 아래 벽쪽으로 조금 더 빠른 유속을 확보하기 위해서 10%씩 질량유량이 증가하도록 설계하였다.

## 2.2 Numerical Method

우선 해석해야 할 각 케이스 별 덕트 유동 시스템의 형상 구현, Meshing, 경계조건 설정 등의 전반적인 Pre-processing 과정은 GAMBIT을 사용하여 설계하였다. 좌우 대칭 조건을 이용하여 형상의 반만을 해석하였고, 각 경우 마다 40만개 정도의 격자를 사용하였다. Processing 과정은 FLUENT를 사용하였으며, 난류 모델로는 비압축

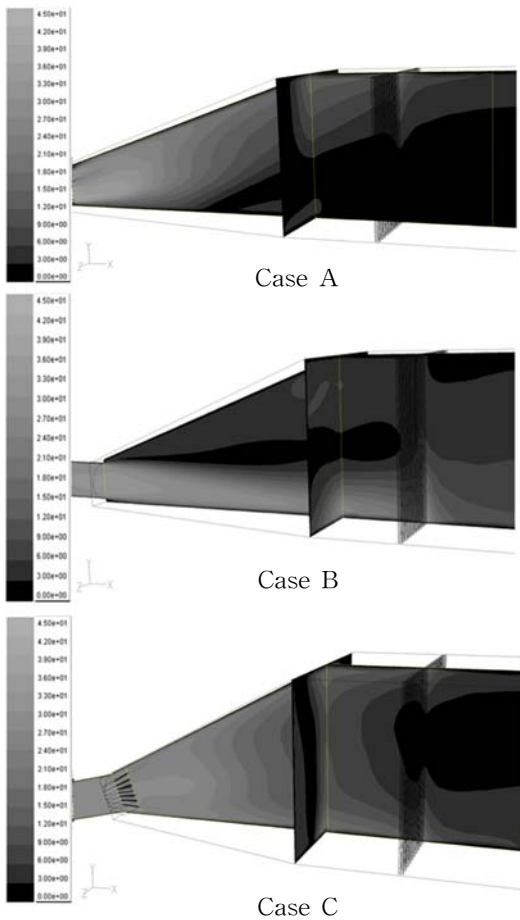


Fig. 3 Velocity contour on symmetric surface and cross section of boiler inlet

성, Standard  $k-\epsilon$  Model을 사용하였다. 입구 경계조건으로는 속도가 28.65 m/s인 균일 속도 조건을 사용하였고, 출구는 open condition을 적용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

먼저, 고안한 가이드 베인의 배치 및 형상은 선형 확장유로가  $z$  방향에 비하여  $y$  방향으로 더 크게 증가하기 때문에 주로  $y$  방향에 대한 온도 및 유속의 균일성을 향상 시키는데 초점을 두었다.

각 케이스 별 속도장 분포는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 먼저 속도장에 대한 결과를 분석해보면 Case A의 경우에는 윗면의 확장되는 영역

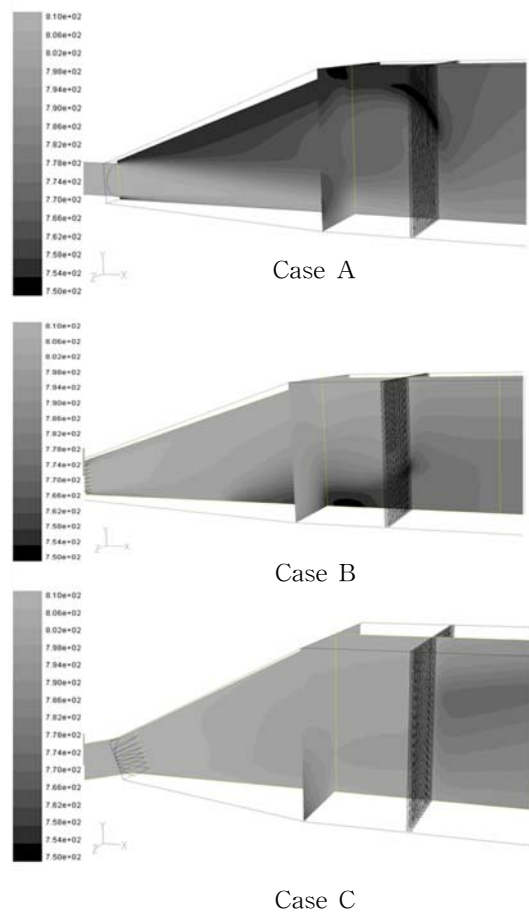


Fig. 4 Temperature contour on symmetric surface and cross section of boiler inlet

에서 와류가 발생하며 덕트의 아랫면을 따라서 빠른 속도를 가지면서 흐르는 것을 확인할 수 있다. Case B에서는 앞서 언급하였듯이 상부의 가이드 베인의 끝부분에서 상당한 노즐효과가 발생하면서 덕트의 윗면을 빠른 속도로 타면서 흐르는 것을 알 수 있다. Case C는 덕트의 출구에서 전반적으로 균일한 속도 분포가 형성되는 것을 보이며, Case A와 Case B에서 나타나는 단점인 특정 벽면으로 유속이 집중되는 현상이 많이 감소한 것을 확인할 수 있다.

하지만 실제 유동에서는  $z$  방향으로 확장 영역에 의한 정체 와류(Stagnation Vortex)가 발생하며 그 영향은 생각보다 큰 것을 확인하였다. 이러한 결과를 보다 구체적으로 확인하기 위하여 덕트 출구의 단면을 2차원적으로 평균한 속도 및 분산 그리고 단면의 중앙 대칭선의 평균 및 분산

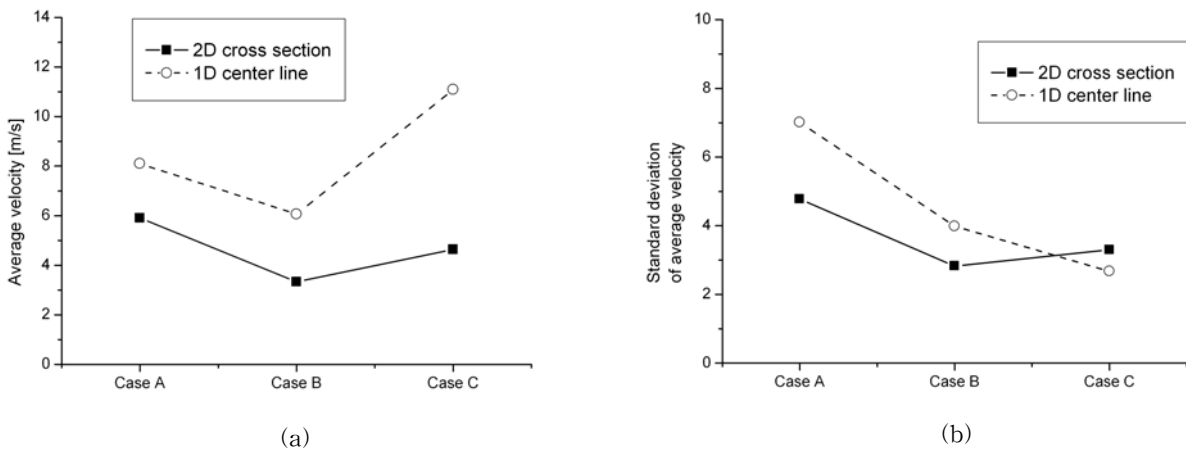


Fig. 5 Average velocity and standard deviation of average velocity for different geometry

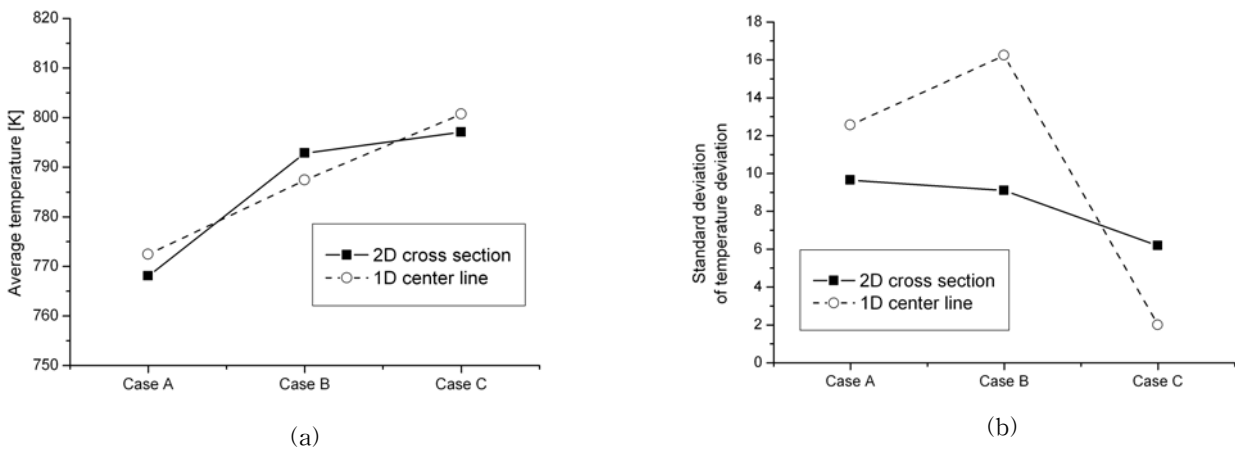


Fig. 6 Average temperature and standard deviation of average temperature for different geometry

을 계산하여 속도의 비균일성을 분석하였다(Fig. 5). Fig. 5(a)에서 확인할 수 있듯이 Case C의 경우 1차원 평균값이 매우 크고, 2차원 평균값은 상대적으로 작은 것이 관찰되었다. 따라서  $z$  방향으로의 정체 와류가 Case A와 B에 비해서 상대적으로 강하게 형성되는 것을 확인하였다. 하지만 Fig. 5(b)에서 보여지 듯 속도의 균일성은 대칭선에서 매우 균일한 것을 확인할 수 있다.

속도장과 마찬가지로 각 케이스에 대한 온도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 유속의 균일성은 온도의 균일성에 매우 큰 영향을 미친다. 온도의 균일성은 보일러에서 효과적 증기 발생을 위해서 반드시 필요한 조건이다. 그림에서 보여지듯 Case C의 경우 매우 균일

한 온도 분포를 보임을 알 수 있다. Case A와 B의 경우, 열 흡수원으로 설정한 Fin Tube에 의해서 유동이 한 곳으로 집중되고, Fin Tube가 일종의 벽 역할을 하여 덕트의 윗면(Case A)과 아랫면(Case B)에서 재순환이 발생하고, 유동이 정체하게 된다.

속도장과 마찬가지로 온도장의  $y$  및  $z$  방향의 비균일성을 확인하기 위해 덕트 출구에서의 2차원 평면과 중앙 대칭선에서의 평균 및 분산값을 비교하였다. 온도장의 경우 Case C가  $y$ 와  $z$  방향 모두 균일한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6(b)). 평균온도도 Case B에 비해서 약간 상승한 것을 알 수 있다.

각 케이스에 대해서 총 압력손실은 Case A의 경우 549.6 Pa, Case B의 경우 822.9 Pa, Case C

의 경우 470.2 Pa로 각각 계산되었다. Case B의 경우 예상하였듯이 노즐 효과로 인해 상대적으로 많은 압력손실이 있었고, Case C의 경우 압력손실을 최소로 할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 1 MW급 열병합 발전 시스템에서 선형 확장 유로를 가지는 덕트의 출구를 통과하는 유체의 온도 균일성을 향상시키기 위해 기존의 300 kW급 열병합 발전 시스템에 사용되었던 디자인을 변경하여 전치 가이드 베인의 최적 배치 및 형상을 설계하였다. 향상된 디자인의 경우 매우 균일한 덕트 출구의 온도 분포를 얻을 수 있었다. 주로 y 방향의 온도 및 유속의 균일성을 향상 시키는데 초점을 두었고, y 방향의 속도 균일성은 z 방향에 비해서 온도의 균일성에 좀 더 많은 영향을 주는 것으로 판단되었다. 그러나 측면에서의 속도 균일성을 위해 z 방향으로의 가이드 베인 설치가 필요하다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. Lee, B. E., Kwon, S. B., and Lee, C. S., 2002, On The Effect of Swirl Flow of Gas Turbine Exhaust Gas in an Inlet Duct of Heat Recovery Steam Generator, ASME J. Transaction, Vol. 124, pp. 496-502.
2. Hubert, N., Reinhard, P., Eisenkolb 2001, Developments in HRSG Technology, The 7<sup>th</sup> Annual Industrial and Power Gas Turbine O&M Conference, Birmingham, UK, Nov. pp. 14-15
3. Splilethoff, H., Rieger, T., Bruckner, J., Woyke, W. 2006, Investigation of Advanced Waste Heat Boiler Concepts, The 10<sup>th</sup> International Conference on Boiler Technology