



배열회수보일러 입구 덕트 확관 형상 변화에 따른 전열관군 전단 유동균일화 특성

†하지수

계명대학교 에너지환경과학과

(2012년 1월 21일 투고, 2012년 2월 24일 수정, 2월 24일 채택)

Characteristics of Flow Uniformity at the Section before Tube Bank with the Change of Expansion Inlet Duct Shape in a Heat Recovery Steam Generator

† Ji Soo Ha

Energy&Environmental Science, Keimyung University, Daegu 1000, Korea

(Received February 1, 2012; Revised February 24, 2012; Accepted February 24, 2012)

요 약

복합 화력발전소 배열회수보일러에서의 입구 덕트 확관 형상 변화에 따른 전열관군 전단에서의 유동 균일화 특성을 유동수치해석을 통하여 분석하였다. 배열회수보일러의 입구는 가스터빈 후류의 출구에 해당하고 가스터빈 후류는 강한 선회 및 난류 유동이다. 본 연구에서 배열회수 보일러 입구 유동 경계조건은 가스터빈을 통과한 출구 유동 해석 결과를 이용하여 수행하였다. 배열회수보일러의 전열관군 전단에서의 유동 균일화 특성이 배열회수 보일러의 효율에 직결되므로 입구 덕트 확관 변곡점의 위치 변화에 따라 유동 균일화 특성을 파악함으로써 배열회수 보일러의 형상 최적화의 기반을 마련하는 것을 목적으로 하였다. 본 연구로부터 배열회수 보일러 확관의 변곡점의 위치가 기준 형상에서 낮은 위치에서 전열관군 전단에서 최적의 유동 균일화가 이루어짐을 알았다.

Abstract - The present study has been carried out to analyze the flow characteristics in the inlet expansion duct of a heat recovery steam generator by using numerical flow analysis. The inlet of HRSG corresponds the outlet of gas turbine exit and the flow after gas turbine has strong swirl flow and turbulence. The inlet flow condition of HRSG should be included the exit flow characteristics of gas turbine. The present numerical analysis adopted the flow analysis result of gas turbine exit flow as a inlet flow condition of HRSG analysis. Because the flow characteristics in the inlet duct of the tube bank is strongly related to the performance of a HRSG, it is most important for the optimal design of HGSG to understanding the flow phenomena in the inlet duct of HRSG. From the present study, the position of breakpoint in the inlet expansion duct should be lower than the reference breakpoint position for the optimal flow uniformity before the tube bank.

Key words : heat recovery steam generator, inlet expansion duct, recirculation 후류 region, breakpoint position, flow uniformity

†주저자:jissooha@kmu.ac.kr

I. 서론

복합 화력발전은 가스터빈과 발전기를 연결하여 전기를 생산하고 가스터빈에서 나오는 고온의 배기가스를 회수하는 배열회수 보일러를 사용하여 증기를 만들어 이것으로 증기터빈을 구동시켜 다시 전기를 생산하는 발전 방식이다. 배열회수보일러의 배기가스 배열 회수 효율은 이러한 복합 화력발전에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 배열회수 보일러의 배열회수 효율은 배열회수 보일러의 전열관군에 들어가는 배기가스가 균일하게 들어가도록 하는 것에 직접적인 연관성이 있다.

가스터빈에서 흘러나오는 배기가스 유동은 강한 회전 유동이며 배열회수 보일러를 연결하는 배관에서 유동 분포는 균일한 속도를 가지지 않고 반경에 따라 속도가 다른 분포를 가지고 있다. 따라서 배열회수 보일러의 유동 특성을 해석하기 위해서는 가스터빈 출구의 속도 분포를 활용하여야 보다 적합한 해석 결과를 도출할 수 있음을 기존의 연구[1]에서 알 수 있었다. 또한 배열회수 보일러에서 전열관군의 열전달과 압력손실에 관한 연구[2], 배열회수 보일러의 부분 부하 운전에 따른 유동 불균일이 과열기의 성능에 미치는 연구[3]와 이와 관련하여 과열기 튜브에서의 응력거동 해석[4] 그리고 최근에는 배열회수 보일러의 유동특성에 관한 수치적 연구[5] 등이 수행 되었다. 배열회수보일러에 관하여 많은 연구자들에 의해 연구되었지만 배열회수 보일러의 배열회수에 직접적인 연관이 있는 전열관군 전단에 있는 확관에서 유동 특성을 규명한 연구는 거의 없었다.

본 연구에서는 배열회수 보일러의 전열관군 전단에 있는 확관에서 유동 특성을 살펴보고 확관에서의 재순환 유동 특성, 전열관군 전단에서 유동 균일화 특성을 규명하여 배열회수 보일러의 배열회수 효율 향상의 기반을 마련하는 것을 목적으로 하였다.

II. 수치해석방법

배열회수 보일러의 전열관군 전단에 대한 유동을 해석하기 위하여 배열회수 보일러의 입구 확대 덕트 및 고온의 배기가스와 열교환하여 증기를 생산하는 열교환 배관 모듈에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 배열회수보일러 입구 영역은 사각형상의 2단 급확대 덕트로 이루어져 있다. 급확대 덕트 이후에 열교환 배관을 지지하는 가로 방향의 연속 범퍼, 열교환 배관들로 이루어져 있다. 배열회수보일러 입구 전 영역은 가스터빈 출구이며 여기에서 흘러나오는

고온의 배기가스가 배열회수 보일러로 흐르게 된다.

이러한 유동은 충분한 난류유동이며 또한 고온의 배기가스가 흘러가면서 열교환 배관들과 열전달을 하게 된다. 이미 가스터빈에서 연소반응이 완료되었기 때문에 HRSG 유동해석에서는 연소반응을 고려하지 않아도 된다. 다만 배기가스에 포함된 각종 화학종과 온도에 따른 물성치 변화는 고려해야 한다.

따라서 배열회수 보일러 유동해석에 필요한 지배방정식은 일반적인 3차원 유체역학의 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 그리고 난류 관련 방정식으로 구성할 수 있다. 난류모델은 realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고 다음에 정리하였다.

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}) - \overline{\rho u_i' u_j'}] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i H) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{k_t}{C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} H) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_j) \quad (4) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{H_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon U_j) \quad (5) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{H_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned}$$

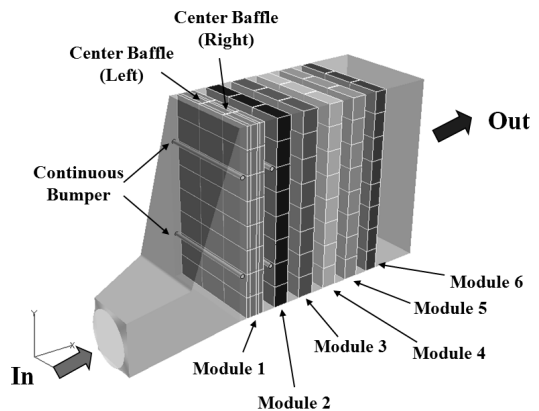


Fig. 1. Computational modeling of the present heat recovery steam generator.

배기가스의 성분은 가스터빈에서 연소된 배기가스로서 질소, 이산화탄소, 수증기 등 여러 가지 성분으로 구성되어 있으며 각 성분의 온도에 대한 밀도, 점성계수, 비열, 열전도율을 각각 구하고 혼합가스의 물성치로 변환하여 본 연구의 수치계산에 이용하였다.

입구영역의 경계조건은 배열회수 보일러의 운전 조건중 가장 자주 사용 되는 운전 조건에서의 가스터빈 후류영역의 계산 결과 데이터를 이용하였고 열교환 배관 모듈은 총 6개의 모듈로 구성되어 있으며 열손실이 있는 다공성 매질로 모사하였으며 압력손실과 열전달은 각 모듈별 압력과 온도 강하에 적합하도록 조정하였다. 특히 다공성 매질의 압력손실은 각 모듈에서 주어진 압력손실 만큼 유동에 따른 손실계수를 조절하여 적합하도록 하였다.

본 연구에서 열유동해석에 사용한 전산해석 소프트웨어는 열유체 전산해석에 널리 사용되고 있는 상용코드인 Fluent 소프트웨어를 사용하였다. 본 연구의 사전 연구^[1]에서 배열회수 보일러 형상은 다소 상이하지만 격자수를 50만, 70만, 90만, 110만, 160만,

180만 200만개의 격자수를 변화하면서 나타나는 결과의 안정성을 검사하였는데 이 결과로부터 160만개 이상에서 안정된 결과를 도출하였다. 본 연구에서 격자의 개수는 약 228만개를 사용하였으며 이 개수는 사전 연구에서 판단할 때 충분히 안정된 결과를 도출할 것으로 판단한다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 배열회수 보일러 입구 유동 특성

배열회수 보일러 입구의 유동은 2절에서 언급한 바와 같이 가스터빈 후류에서 계산한 유동 결과를 이용하기로 하였다. 가스터빈 후류의 유동은 가스터빈에서의 회전유동이 소멸되지 않고 그대로 흘러나오기 때문에 일반적인 유동 해석 시에 사용하는 평균 유량으로 환산한 균일 속도 분포 유속을 사용하면 많은 오차를 유발할 수 있다.

본 연구의 사전 해석으로 도출한 배열회수 보일러 입구의 유속 분포, 온도 및 난류 특성 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 질량 유량은 752.5kg/sec이고 배

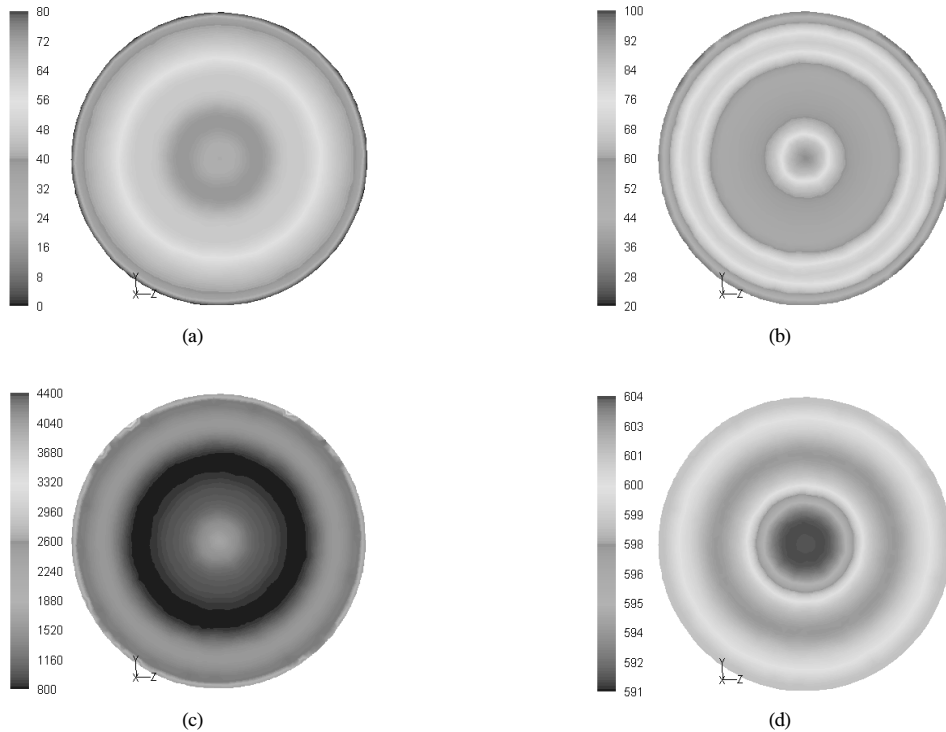


Fig. 2. The inlet gas profiles of (a) axial velocity(m/s), (b) turbulent kinetic energy(m^2/s^2), (c) turbulent dissipation rate(m^2/s^3) and (d) temperature($^{\circ}C$).

열회수 보일러 입구에서의 평균온도는 622.8°C이다. Fig. 2 (a)에서 보는 바와 같이 축 방향 속도 분포는 정 가운데보다 약간 떨어진 곳에서 최대속도를 보이고 있고 반경방향으로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다. (b)에서 난류에너지 분포는 중심에서 가장 큰 값을 보이고 있고 반경방향으로 가면서 속도의 구배가 큰 곳에서 한 번 더 극대값이 존재하고 있다.

입구영역의 온도분포 특성은 Fig. 2 (d)와 에서 살펴볼 수 있는데 정 가운데에서 보다 반경방향의 중간에서 온도 최대값이 나타난다. 이러한 유동 조건을 이용하여 배열회수 보일러의 전열관군 전단에서의 유동특성을 살펴보기로 한다.

3.2. 확관 형상 변화에 따른 유동 특성

본 절에서는 3.1절에서의 입구 유동 조건으로 배열회수 보일러의 전열관군 전단의 확관 형상을 변경했을 때 유동 현상에 대한 것을 고찰하기로 한다. Fig. 3에 확관 형상 변경에 대한 몇 가지 Case를 도시하였다. 확관 영역은 2단 경사 확관으로 구성되어 있는데 1단과 2단 경사각도가 변하는 점의 위치를 기준점의 경우에 대한 것을 Case_0로 하고 이 점의 위치를 아래로 3 위치 위로 2 위치를 변경하여 총 6 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Case_down_3의 경우는 변곡점의 위치가 입구 상단의 위치와 같

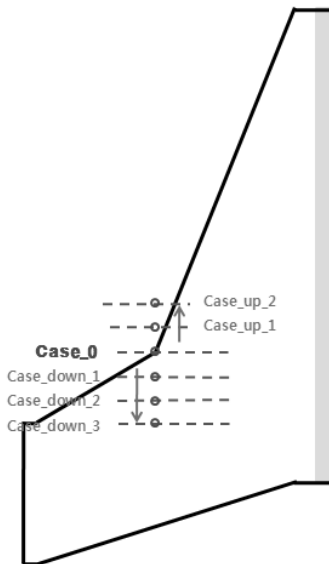


Fig. 3. Schematic configuration of the inlet expansion duct with the notation of numerical analysis cases.

도록 하였고 Case_down_1, Case_down_2의 위치는 같은 간격으로 하였다. Case_up_1과 Case_up_2의 간격도 같도록 하였다. 이 6 가지 경우에 대하여 확관 내부에서 유동 현상과 전열관군 전단에서의 유동 균일화에 대한 비교를 살펴보기로 한다. Fig. 4에 z=0인 대칭 단면에서의 6 가지 Case에 대하여 확관 영역에서 속도 크기의 등고선을 나타내었다.

Case_0의 경우인 Fig. 4 (c)를 우선 살펴보면 배열회수 보일러 확관 입구에서 흘러 들어오는 유동이 수평과 거의 평행한 유동인데 확관 하부의 경사면과 상부의 경사면이 있어도 확관에서는 입구에서 수평 유동인 관성 유동에 의해 전열관군 전단까지는 거의 수평 유동이 대부분을 차지한다. 전열관군을 만나면 유동저항에 의해 상부로 유동이 흐르게 되는 것이 약간 관찰된다. 상부 경사면이 상부로 영역이 넓어지는 형상을 가지고 있고 이 영역에서는 유동 속도가 크지 않고 정체 영역이 형성됨을 볼 수 있다. 이러한 정체 영역은 재순환 유동을 동반하는 영역이다.

전열관군 전단에서 유동을 보다 더 균일하게 유도하기 위하여 경사각 변곡점의 위치를 상부로 이동시킨 경우인 Case_up_1과 Case_up_2의 경우에 대한 속도크기 등고선을 보면(Fig. 4(a), (b)) Case_0의 경우와 유사하게 주된 유동 방향은 수평 방향을 유지하고 있다. 상부의 재순환 영역은 기준 Case 보다 더 넓게 형성되어 있다. 재순환 영역이 넓으면 유동 박리 영역이므로 유동 균일화에는 악영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

이번에는 기준 변곡점에서 아래 방향으로 위치를 이동한 경우인 Case_down_1,2,3(Fig. 4(d),(e),(f))의 경우를 살펴보기로 한다. 주된 유동은 다른 경우와 유사하게 수평 방향을 유지하고 있다. 상부 영역의 재순환 유동 영역은 줄어들었지만 이로 인하여 유동이 균일하여졌는지 예측하기 어렵다.

Fig. 5에 기준 형상인 Case_0의 경우에 상부의 재순환 영역에서 유동 특성을 살펴보기 위해 속도벡터와 유선을 함께 나타내었다. 속도벡터(Fig. 5(a))는 z=0인 대칭축에서 나타난 것인데 상부에서 재순환하는 유동을 잘 관찰할 수 있다. Fig. 5(b)에 나타난 유선에 특성을 살펴보면 하부에서 전열관군의 저항으로 상부로 향하는 재순환 유동을 관찰할 수 있고 또한 확관의 양 가장자리 부분에서부터 가운데로 모이는 재순환 유동을 관찰할 수 있다.

Fig. 4에서 검토하였듯이 변곡점의 변화에 따라 유동이 균일화 되었는지에 대한 것을 정량적으로 비교를 하지는 못하였다. 상부 경사각 변곡점의 위치 이동을 통한 유동 균일화 효과에 대한 정량적인 비교는 수평방향 속도가 열관군에 수직으로 들어가는

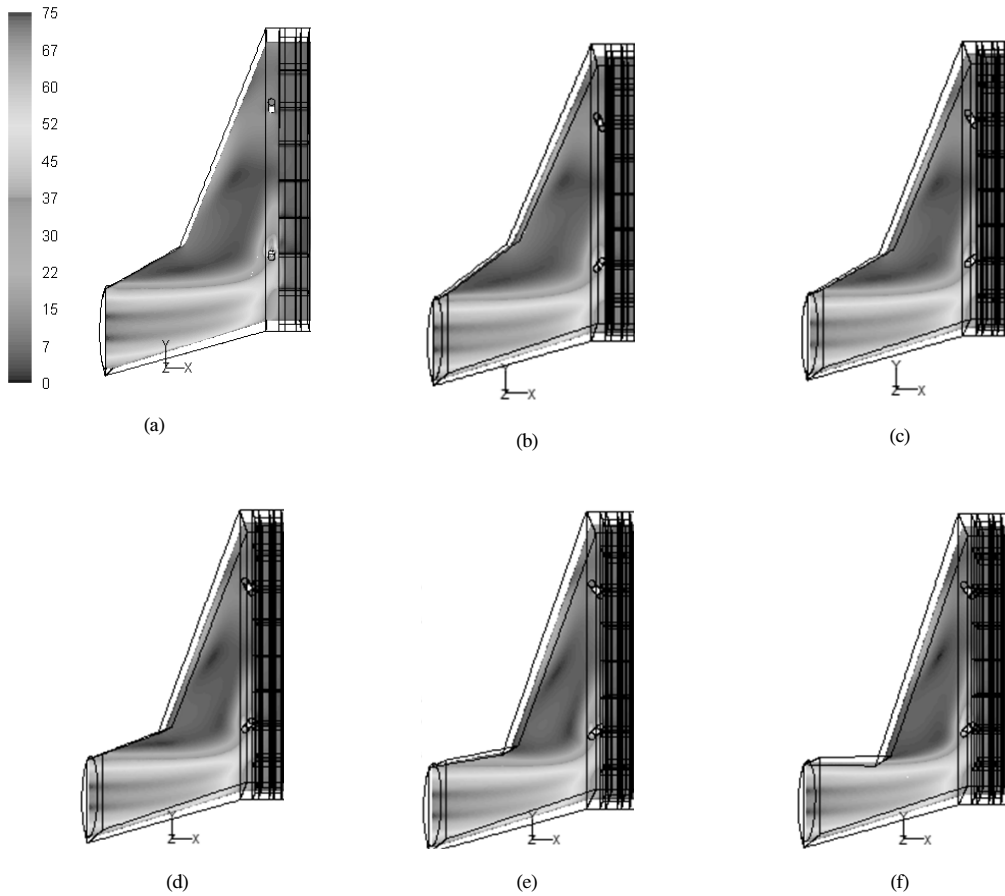


Fig. 4. Comparison of the velocity magnitude contours at the center section of HRSG($z=0$) for (a) Case_up_2, (b) Case_up_1, (c) Case_0, (d) Case_down_1, (e) Case_down_2 and (f) Case_down_3.

유동을 나타내므로 전열관군 입구에서 수평방향의 속도(V_x)에 대한 분포편차를 비교함으로써 판단할 수 있다. 일반적으로 배열회수보일러의 전열관군 전단에서의 유동균일화는 전열관군 입구에서 수평방향 속도의 평균값에서 $\pm 50\%$ 내의 속도 값을 가지는 면적이 단면적 전체 면적에서 차지하는 비율로써 비교하기로 한다. 각 경우에 대하여 이러한 비율을 비교한 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 그래프를 살펴보면 기준형상인 Case_0의 경우의 면적비가 약 71%로 나타났고 변곡점 위치를 상부로 이동한 경우에는 면적비가 낮게 나와서 유동균일화에 좋지 않은 결과를 가져다준다는 것을 알 수 있다. 기준 형상에서 변곡점 위치를 아래 방향으로 변경한 경우에는

면적비가 증가하다가 감소하고 있다. 가장 효과가 좋은 경우는 Case_down_2인 경우로서 면적비가 약 72%로 나타났다. 따라서 현재의 계산 결과로 볼 때 최적의 확관 형태는 Case_down_2이라고 판단할 수 있다. 그러나 면적비의 크기를 보면 최소 면적비가 기준 형상으로부터 $71 \pm 1\%$ 의 범위이기 때문에 변곡점 위치 변화에 따라 유동균일화에 많은 변화를 초래한다고는 볼 수 없다. 유동균일화를 위하여 확관 내부에 유동 균일화 가이드베인을 설치하는 것이 가장 효과적일 수 있지만 배열회수 보일러 전방의 가스터빈에 미치는 영향, 가이드베인이 고속으로 흐르는 유동의 충돌과 고온의 유체에 노출되는 것 등을 감안하여 내부에 가이드베인을 설치하는 것은 실제

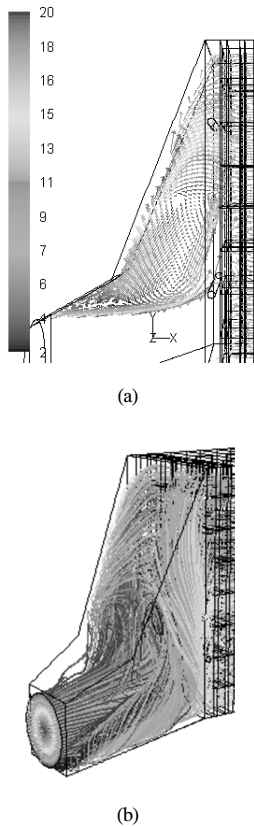


Fig. 5. Flow characteristics in the inlet expansion duct of Case_0 with (a) velocity vector in the upper region and (b) streamlines.

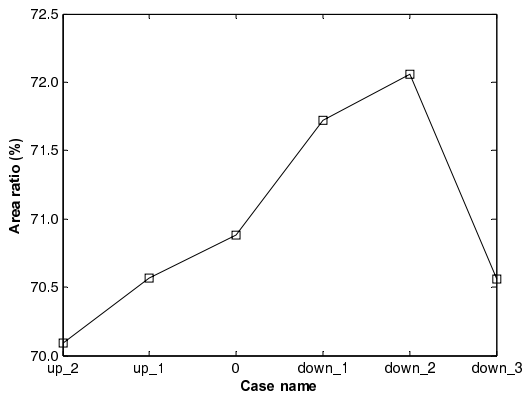


Fig. 6. Comparison of the area ratios at the plane before the tube bank.

설계상에서 제약이 따르기 때문에 본 연구에서는 검토에서 제외하였다.

IV. 결론

지금까지 배열회수 보일러에서 입구 덕트 확관에서 형상 변경에 따른 전열관군 전단에서의 유동 특성을 수치해석을 통하여 살펴보았으며 다음과 같이 결과를 요약할 수 있다.

(1) 배열회수 보일러의 입구 조건은 배열회수 보일러가 가스터빈 후단에 위치하기 때문에 가스터빈 후단의 유동조건인 3차원 유속, 난류특성, 온도 특성을 사용하여 배열회수 보일러의 유동해석을 수행하여야 한다. 가스터빈 출구에서의 축방향 유속은 중심에서보다 중심에서 약간 벗어난 곳에서 최대 유속이 존재하였고 난류강도는 중심에서와 중심에서 벗어난 곳, 두 곳에서 극대값이 나타났다. 온도의 최대값은 축방향 속도와 유사하게 중심에서 보다 약간 벗어난 곳에서 최대값이 존재하였다.

(2) 배열회수 보일러 입구 덕트 확관 형상은 변곡점의 위치를 기준점에서 위와 아래로 변경하였으며 대칭축인 $z=0$ 에서의 속도분포를 살펴 본 바, 입구에서부터의 수평방향 유동은 관성에 의해서 방향을 바꾸어 상부로 흐르지 못하고 대부분의 유동이 전열관군 전단까지 수평방향으로 흐름을 알 수 있었다.

(3) 입구 덕트 확관에 있는 변곡점의 위치를 변화하였을 때 기준 형상에서 상부로 변곡점을 변화시키면 유동의 균일화에 역효과를 보여주었고 기준점에서 아래방향으로 이동을 할 경우 Case_down_2의 위치가 유동 균일화에 가장 효과적인 형상임을 밝혔다. 유동균일화를 더욱 적극적으로 하는 방법인 가이드베인 설치는 가스터빈 운전성능, 가이드베인 안전성 등으로 본 연구의 검토에서 제외하였다.

참고문헌

- [1] 김태권, 이부윤, 하지수, "배열회수보일러(HRSG)의 입구유동 경계조건에 따른 유동특성 변화에 관한 연구", 한국가스학회 논문집, 제 15권, 3호, 53-57, (2011).
- [2] 박재동, 박일웅, 김경천, "HRSG 관군의 열전달 및 압력 강하: 실험적 연구", 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 논문집, 141-146, (2000).
- [3] 정재현, 송종일, "배열회수보일러의 부분부하운전에 따른 유동불균일이 과열기의 성능에 미치는 영향", 에너지공학회 논문집, 제17권 제3호,

배열회수보일러 입구 덕트 확산 형상 변화에 따른 전열관군 전단 유동균일화 특성

- 161-166, (2008).
- [4] 정재현, 송종일, “배열회수보일러의 부분부하운전에 따른 과열기 튜브들의 응력거동 해석”, 한국태양에너지학회지, 제28권 제6호, 33-39, (2008).
- [5] 최훈기, 유근중, 신병국, 김철환, “배열회수장치의 유동특성에 관한 수치적 연구”, 한국전산유체공학회지, 제15권 제1호, 17-23, (2010).