



배열회수보일러(HRSG)의 입구유동 경계조건에 따른 유동특성 변화에 관한 연구

김태권 · 이부윤 · †하지수*

계명대학교 기계자동차공학과, *계명대학교 에너지환경과학과
(2011년 2월 7일 접수, 2011년 6월 25일 수정, 2011년 6월 25일 채택)

A Numerical Analysis of Flow Characteristics in a Heat Recovery Steam Generator with the Change of Inlet Flow Conditions

Tae Kwon Kim · Boo Yoon Lee · † Ji Soo Ha*

Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 1000, Korea

**Environmental Science, Keimyung University, Daegu 1000, Korea*

(Received February 7, 2011; Revised June 25, 2011; Accepted June 25, 2011)

요 약

본 연구는 배열회수보일러(HRSG)에서의 유동특성을 유동수치해석을 통하여 분석하였다. HRSG 입구영역은 가스터빈 후류의 출구에 해당하고 가스터빈 후류는 강한 선회 및 난류 유동이다. 따라서 HRSG 입구 유동은 가스터빈 출구 유동 특성이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 HRSG 입구 유동 경계조건을 가스터빈 출구 유동 해석을 통하여 도출된 결과를 이용하였다. 가스터빈 출구 유동해석 결과를 보면 축방향 속도가 가장 크게 나타나는 곳이 원형 덕트의 벽면 측이고 난류운동에너지와 소산율이 크게 나타나는 곳이 속도 구배가 급격한 곳으로 축방향 속도가 최대가 되는 곳과 차이가 있다. 본 연구에서는 HRSG 입구영역에서의 난류 성분을 가스터빈 출구 유동을 계산한 결과를 이용한 경우와 난류강도를 속도의 10%를 이용하고 원형 덕트의 직경을 특성 길이로 사용한 두 가지 경우에 대하여 유동해석을 통하여 유동 특성을 비교하였다. 본 연구를 통하여 HRSG 입구 유동 경계조건은 반드시 난류성분이 올바르게 적용되어야 HRSG 유동 특성 해석의 정확성을 기할 수 있음을 알았다.

Abstract - The present study has been carried out to analyze the flow characteristics of a heat recovery steam generator with the change of inlet flow conditions 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. The computational flow analysis result of gas turbine exit shows that the maximum axial velocity appears near circular duct wall and the maximum turbulent kinetic energy and dissipation rate exist relatively higher gradient region of axial velocity. The comparison of flow analysis will be executed with change of inlet turbulent flow condition. The first case is using the inlet turbulent properties from the result of computational analysis of gas turbine exit flow, and the second case is using the assumed turbulent intensity with the magnitude proportional to the velocity magnitude and length scale. The computational results of flow characteristics for two cases show great difference especially in the velocity field and turbulent properties. The main conclusion of the present study is that the flow inlet condition of HRSG should be included the turbulent properties for the accurate computational result of flow analysis.

Key words : heat recovery steam generator, inlet flow condition, turbulent kinetic energy, turbulent viscosity

†교신저자:jisooa@kmu.ac.kr

I. 서론

배열회수보일러는 가스터빈 발전에서 터빈 회전력을 발생시킨 후에 남은 고온의 배기가스를 열교환 배관군을 통과시켜 증기를 생산하는 장치로서 열병합발전이나 복합발전의 열효율 향상에 매우 중요한 장치이다. 이러한 배열회수 보일러는 열교환 배관군의 전열면적을 극대화하기 위해 가스터빈을 나온 배기가스는 원형 덕트를 지나서 열교환 배관군의 전단에서 급격한 확대 덕트가 있는 형상을 가지고 있다.

배열회수보일러는 해석 및 설계와 관련하여 가스터빈 후류 유동에 따른 회전 유동 특성, 급격한 확대관에 따른 유동 변화 그리고 전열관군에서의 압력손실과 열전달 등 고려해야할 요소들이 많이 있다. 이와 관련한 연구는 전열관군의 열전달과 압력손실에 관한 연구[1], 배열회수 보일러의 부분 부하 운전에 따른 유동 불균일이 과열기의 성능에 미치는 연구[2]와 이와 관련하여 과열기 튜브에서의 응력거동 해석[3] 그리고 최근에는 배열회수 보일러의 유동특성에 관한 수치적 연구[4] 등이 수행 되었다. 배열회수보일러에 관하여 많은 연구자들에 의해 연구되었지만 배열회수 보일러 입구 경계조건에 따른 유동해석의 변화와 이에 따른 유동 해석 결과의 신뢰성에 대한 검토에 관한 연구는 거의 없었다. 가스터빈 후류가 배열회수 보일러에 이어지는데 최근의 연구에서도 가스터빈 후류의 선회유동은 고려하였지만 선회유동에 따른 난류 성분에 대한 입구 경계조건은 고려하지 않았다.

배열회수 보일러의 입구 유동은 선회유동이 강한 난류성분이 존재하는데 이에 따라 배열회수 보일러의 후류의 유동은 난류성분 고려 여부에 따른 많은 유동 특성 차이를 초래할 것으로 판단되어 본 연구에서는 배열회수 보일러의 입구 경계조건에서 난류 성분의 고려 여부에 따라 배열회수 보일러 내부 유동의 변화를 비교하여 배열회수 보일러에 대한 유동해석 시 필히 고려해야할 난류 성분 적용방법에 대하여 검토하기로 한다.

II. 수치해석방법

배열회수 보일러(HRSG)의 내부 유동을 해석하기 위하여 배열회수 보일러의 입구 덕트와 확대 덕트 및 고온의 배기가스와 열교환하여 증기를 생산하는 열교환 배관 모듈에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. HRSG 입구 영역은 원형 확관으로 되어 있고 이어서 사각형상의 2단 급확대 덕트로

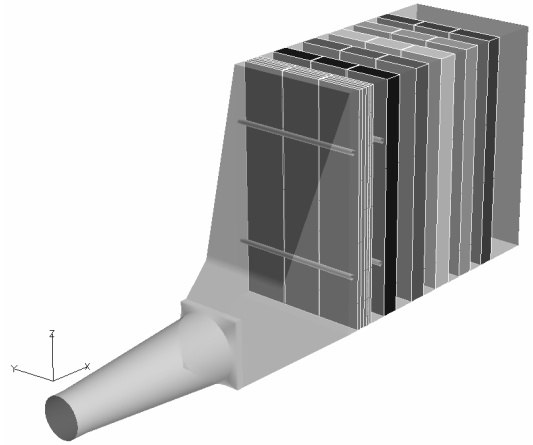


Fig. 1. Computational modeling of the present heat recovery steam generator.

이루어 져 있다. 급확대 덕트 이후에 열교환 배관을 지지하는 가로 방향의 연속 범퍼, 열교환 배관들로 이루어 져 있다. HRSG 입구 전 영역은 가스터빈 출구이며 여기에서 흘러나오는 고온의 배기가스가 HRSG로 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 HRSG에 필요한 지배방정식은 일반적인 3차원 유체역학의 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 그리고 난류 관련 방정식으로 구성할 수 있다. 난류모델링은 standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고 다음에 정리하였다.

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon U_j) \quad (5)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3c} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

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 가스터빈 후류영역의 계산 결과 데이터를 이용하였는데 자세한 데이터 설명은 3절 결과 및 고찰에서 살펴보기로 한다. 열교환 배관 모듈은 열손실이 있는 다공성 매질로 모사하였으며 압력손실과 열전달은 각 모듈별 압력과 온도 강하에 적합하도록 조정하였다.

본 연구에서 열유동해석에 사용한 전산해석 소프트웨어는 열유체 전산해석에 널리 사용되고 있는 상용코드인 Fluent 소프트웨어를 사용하였다. 격자의 개수는 약 228만개를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. HRSG 입구 유동 특성

HRSG 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 HRSG 입구의 유속 분포, 온도 및 난류 특성 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 질량 유량은 608.17kg/sec이고 HRSG 입구에서의 평균온도는 624°C이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 축 방향 속도 분포는 가스터빈에서 흘러나온 시계 역방향으로의 회전 유동을 잘 관찰할 수 있다. 특히 원형 덕트의 벽면 축으로 큰 속도 분포를 보이고 있으며 최대속도는 206m/s이다. 큰 속도 분포를 보이는 형태가 다섯 영역으로 보이는데 이는 가스터빈 후류에 설치되어 있는 5개의 유동 가이드베인의 영향으로 나타난 현상이다. (b)에서 온도분포를 살펴보면 회전유동과 유사한 분포를 보이고 있으며 최대 온도는 659°C이고 최소온도는 586°C이다.

입구영역의 난류특성은 Fig. 2 (c)와 (d)에서 살

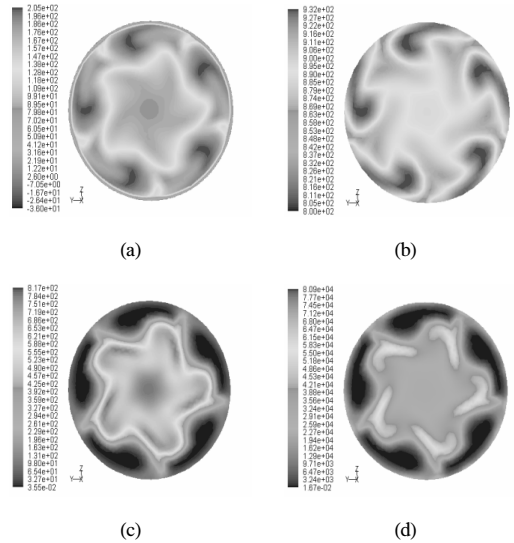


Fig. 2. The inlet gas profiles of (a) axial velocity, (b) temperature, (c) turbulent kinetic energy and (d) turbulent dissipation rate.

펴볼 수 있는데 난류운동에너지의 분포를 보면 축 방향의 최대속도영역에서 난류에너지가 큰 영역이 되는 것이 아니며 오히려 가장 작은 영역으로 나타난다. 난류에너지가 가장 큰 영역은 최대속도 영역에서 원형 덕트의 중심 쪽으로 가면서 속도가 급격히 변하는 영역에서 최대로 나타나고 있다. 이는 난류유동 특성상 속도 구배가 큰 영역에서 난류에너지가 크게 되는 난류 발생 기구로부터 유추할 수 있는 사실이다. 난류소멸율의 분포도 난류에너지의 분포와 유사한 분포를 보여주고 있다.

3.2. HRSG 입구 유동 난류 경계조건에 따른 유동 해석 결과 비교

3.1절에서 보았듯이 HRSG 입구 유동은 강한 회전 유동이고 벽면 부근에 큰 속도 영역이 존재하며 속도구배가 큰 영역에서 난류강도가 크게 나타났다. 본 절에서는 일반적으로 난류분포 정보가 없는 유동을 해석할 때 사용하는 속도크기에 대한 난류강도 10%와 원형 덕트 지름에 해당하는 특성 길이를 이용한 난류 입구 조건을 사용한 경우 (Case 2) 와 실제 가스터빈 후류 유동을 계산한 후의 실제 난류 특성을 HRSG 입구유동 경계조건으로 사용한 경우(Case 1)의 유동 해석 결과를 비교하기로 한다. 위의 두 경우 모두 유동속도 분포와 온도 분포는 가스터빈 후류에서 계산한 분포를 사

용하였다. Fig. 3에 위의 두 가지 경우에 HRSG 입구에서의 난류 에너지와 난류점성계수를 비교하였다.

Fig. 3 (b)를 살펴보면 난류강도를 속도크기의 10%에 비례하도록 계산되었기 때문에 가스터빈 후류의 유동을 계산한 경계조건을 이용한 경우인 (a)와 다르게 속도가 큰 영역에서 난류에너지가 크게 나타났다. 이러한 결과로 HRSG 유동 특성에 영향을 가장 크게 미치는 난류점성계수의 분포도 상반되게 나타난다. 각 경우에 난류점성계수의 분포도 난류운동에너지의 분포와 유사하게 나타나고 있으며 이것은 다음의 난류점성계수 모델식으로 확인할 수 있다.

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad C_\mu = 0.09 \quad (6)$$

위 식에서 μ_t 는 난류점성계수이고 k는 난류운동에너지, ϵ 은 난류소멸율이다. 최대값의 크기는 (c)의 경우가 0.727인데 비하여 (d)의 경우는 약 4의 값을 가져 (c)에 비하여 5.5배의 값으로 나타났다.

난류점성계수의 크기와 분포가 유동 특성에 중요한 이유는 난류점성계수가 크면 유동 편중이나 유동 불균일 성질을 완화하여 유동이 균일화 되게 만들기 때문에 난류점성계수가 큰 영역에 유동 불

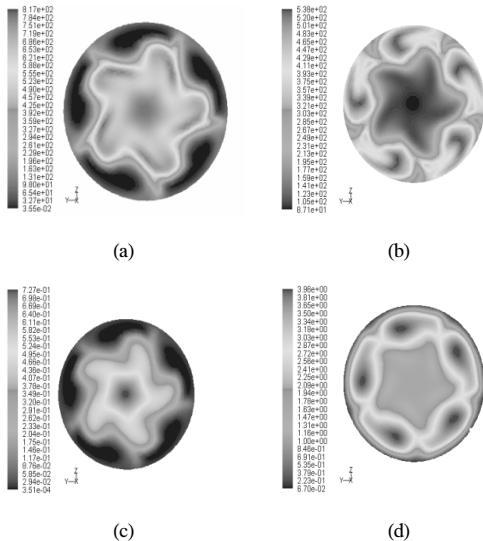


Fig. 3. The inlet gas profiles of turbulent kinetic energy (a, b) and turbulent viscosity (c, d). (a, c) for Case 1 and (b, d) for Case 2.

균일 성질이 있으면 그 성질을 빨리 완화시킨다. 반대의 경우는 유동 불균일 성질을 후류 멀리까지 지속시킨다.

Case 1과 Case2의 경우에 대하여 y=0인 HRSG 중심면에서 축방향 속도 분포를 Fig. 4에 비교하였다. 속도분포를 보면 Case 1의 경우 (a)에는 입구에서 형성된 큰 속도영역이 입구에서 먼 후류까지 지속되는 것을 볼 수 있으며 특히 가운데 영역에서 낮은 축방향 속도를 가지고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이와 다르게 Case 2의 경우에는 입구영역의 큰 축방향 속도성질이 후류까지 멀리 지속되지 못하고 입구 영역에서 얼마 지나지 않아 균일한 유동으로 전환되는 것을 볼 수 있다. 특히 가운데의 낮은 속도 영역이 관찰되지 않는다.

Fig. 5는 HRSG에서 열교환 배관이 시작되는 첫 번째 모듈의 직전의 단면에서 축방향 속도의 분포

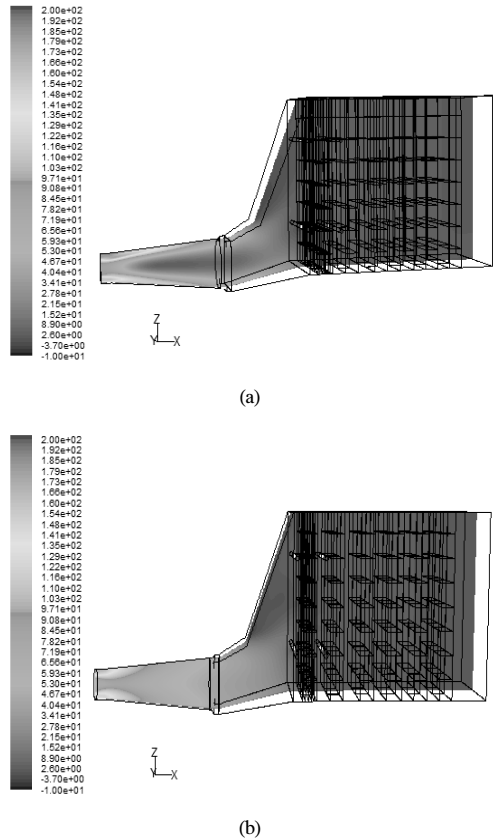


Fig. 4. Comparison of the axial velocity contours at the center section of HRSG(y=0) (a) for Case 1 and (b) for Case 2.

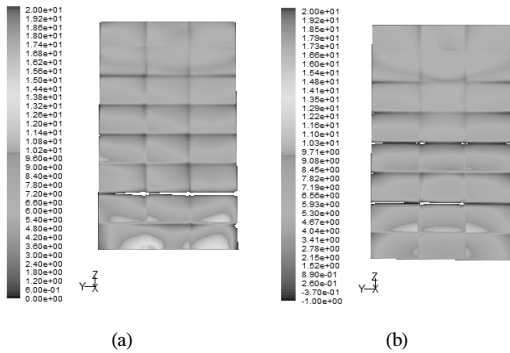


Fig. 5. Comparison of the axial velocity contours at the plane before the 1st module (a) for Case 1 and (b) for Case 2.

를 Case 1 과 Case 2에 대하여 비교한 결과를 나타낸 것이다. 첫 번째 모듈 전단에서의 축방향속도 분포는 HRSG에서 증기 생산 효율에 중요한 역할을 한다. 첫 번째 모듈 전단에서 축방향 속도가 균일해야 열교환 배관들에서 골고루 증기를 생산할 수 있기 때문이다. 유동이 한 쪽으로 치우쳐 있으면 HRSG 증기 생산 효율이 떨어진다. 일반적으로 HRSG 설계시 설계 요구조건이 첫 번째 모듈의 전단에서 축방향 평균유속의 $\pm 50\%$ 범위의 면적이 전체 면적의 90%가 되어야 한다는 것이다. 본 연구의 유동해석 결과에서는 Case 1의 경우가 85.18%이고 Case 2의 경우는 91.21%로 나타났다. 이는 이미 Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5에서 예견할 수 있는 결과이다.

지금까지 유동해석을 통해 분석한 결과는 HRSG 유동해석의 정확도 향상을 위해서는 입구영역에서 유속정보 뿐 만 아니라 난류에 대한 정보도 함께 입력이 되어야 HRSG 내부의 유동을 잘 표현할 수 있음을 알 수 있었다.

IV. 결론

지금까지 HRSG 유동해석시 입구 영역의 경계조건 변화에 따른 HRSG 유동 특성을 비교하였으며 유동해석을 통해 분석한 결과는 HRSG 유동해석의 정확도 향상을 위해서는 입구영역에서 유속정보 뿐 만 아니라 난류에 대한 정보도 함께 입력이 되어야 HRSG 내부의 유동을 잘 표현할 수 있음을 알 수 있었고 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- (1) HRSG 입구유동은 가스터빈 후류의 유동으

로, 회전 유동과 가이드베인의 영향으로 인해 벽면측으로 유동이 치우쳐 있고 최대속도 영역도 벽면측에 존재한다. 난류 운동에너지와 난류소멸율은 최대속도영역과 일치하는 것이 아니라 속도 구배가 큰 영역인 최대속도 영역의 가장자리 영역에 존재한다.

(2) HRSG 입구 영역의 경계조건을 가스터빈 후류의 계산을 통해 유동속도 분포, 온도, 난류성분모두를 사용한 경우(Case 1)와 유동속도분포와 온도는 가스터빈 후류 계산 결과를 이용하고 난류성분은 일반적인 난류계산에 이용하는, 속도크기 10%의 난류강도와 직경에 해당하는 특성길이를 이용한 경우(Case 2)의 입구 영역에서 난류 특성은 크게 상이하게 나타났다. Case 2의 경우는 최대속도 영역에서 난류에너지가 크게 나타나기 때문에 난류 점성계수 분포도 그 영역에서 크게 나타났다.

(3) 난류점성계수가 크면 유동의 불 균일 성질을 균일하게 만들어 주는 특성이 있기 때문에 Case 1의 경우는 최대속도 영역이 HRSG 입구에서 후류로 가면서 상대적으로 멀리까지 유동 형상이 유지되었고 Case 2의 경우는 입구에서 얼마 지나지 않아서 유동이 상대적으로 균일하게 되었다.

(4) 난류점성계수 분포의 영향으로 HRSG 열교환 배관 첫 번째 모듈 전단에서 유동 균일도 설계기준이 90%인데 Case 1의 경우는 85.18%이고 Case 2의 경우는 91.21%로 나타났다. HRSG 유동해석의 정확도 향상을 위해서는 입구영역에서 유속정보 뿐 만 아니라 난류에 대한 정보도 함께 입력이 되어야 HRSG 내부의 유동을 잘 표현할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 박재동, 박일웅, 김경천, “HRSG 관군의 열전달 및 압력 강하 : 실험적 연구”, 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 논문집, 141-146, (2000)
- [2] 정재현, 송중일, “배열회수보일러의 부분부하 운전에 따른 유동불균일이 과열기의 성능에 미치는 영향”, 에너지공학회 논문집, 제17권 제3호, 161-166, (2008)
- [3] 정재현, 송중일, “배열회수보일러의 부분부하 운전하지수에 따른 과열기 튜브들의 응력거동 해석”, 한국태양에너지학회지, 제28권 제6호, 33-39, (2008)
- [4] 최훈기, 유근중, 신병국, 김철환, “배열회수장치 유동특성에 관한 수치적 연구”, 한국전산유체공학회지, 제15권 제1호, 17-23, (2010)