

평판형 STR의 연소공간 형상변화에 따른 성능 예측

김현주[†], 이지홍*, 이명용*, 이상석*, 이도형**

*부경대학교 대학원 에너지시스템 공학과, **부경대학교 기계공학부

The Efficiency Prediction for Plate Type Steam Reformer with Shape Change of Combustion Chamber

HUNJU KIM[†], JIHONG LEE*, MYEONGYONG LEE*, SANGSEOK LEE*, DOHYUNG LEE**

*Dept. of Energy System Engineering, Grad. School of Pukyong National Univ., San 100
Yongdang-dong Nam-gu, Busan 608-739, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National Univ., San 100 Yongdang-dong Nam-gu,
Busan 608-739, Korea

ABSTRACT

According to the propagation of fuel cell system, the importance of that system efficiency is being magnified. Thus, the efficiency improvement of reformer which is the important part of fuel cell system will be required. In structural aspect, the reformer is classified into cylindrical and plate type. Plate type reformer features better maintenance and space efficiency compared with cylindrical type. In this study, we changed the shape of combustion chamber to improve the reforming efficiency. And then we performed the CFD simulation to predict the spacial distribution of temperature. Analysis cased contains with baffles, fins, baffles and fins, and without those. In case of only with-baffle, temperature distributions were uneven because the high temperature stream was concentrated near the baffle end. In case of with-fin, the temperature distributions were relatively even than other cases.

KEY WORDS : Plate type steam reformer(평판형 수증기 개질기), Combustor(연소기), CFD(전산유체역학), Baffle(배플), Fin(핀)

Nomenclature

T_{avg} : average temperature, K

Q_{STR} : heat transfer at STR surface, W

D_p : particle diameter, m

P : pressure, N/m²

x : porosity

μ : viscosity coefficient, m²/s

u : velocity, m/s

ρ : density, kg/m³

ϕ_p : particle coefficient

T : temperature, K

[†]Corresponding author : scythers@pknu.ac.kr

[접수일 : 2010.7.30 수정일 : 2010.8.19 게재확정일 : 2010.8.20]

1. 서 론

근대 산업혁명 이후 지속적으로 사용되어온 화석 연료로 인해 여러 가지 사회적, 환경적 문제가 야기되고 있으며, 이러한 화석 연료를 대체하기 위하여 풍력, 태양광, 태양열, 연료전지 등 여러 가지 신재생에너지들이 제안되고 있다. 그 중에서도 가정용 소규모 및 중규모 발전의 대안으로써 연료전지가 큰 각광을 받고 있다.

연료전지의 종류에 따라 차이가 있지만 대부분의 연료전지는 수소를 연료로 사용한다. 또한 환경오염에 관한 경각심이 높아지고 신재생에너지가 각광을 받으면서 그중에서도 수소가 에너지의 근간이 되는 수소사회 구축이 주목받고 있다. 이에 따라 연료전지용 연료뿐만 아니라 다른 수소 이용 분야에서도 수소의 원활한 공급을 위한 수소의 생산 방법에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

수소의 생산 방법에는 일반적으로 물의 전기분해, 개질, 석탄가스화 등의 방법이 있다. 전기분해는 생산단가가 상대적으로 고가이며, 석탄가스화의 경우는 시스템의 규모로 인해 다양한 분야에 적용하는 것에 한계가 있다. 이에 비하여 개질 시스템은 생산단가가 상대적으로 저렴하며, 적용될 시스템에 대하여 상대적인 규모 축소가 가능하여 많은 분야에서 사용되고 있다. 그 중에서도 수증기 개질(steam reforming : STR) 시스템은 수소의 생산량이 상대적으로 많고 안정적인 운전이 가능하기 때문에 많은 분야에서 사용되고 있으며, 이러한 장점 때문에 연료전지 시스템에서도 많이 사용되고 있다¹⁾.

연료전지 시스템에 사용되는 개질기는 그 형태에 따라 크게 원통형과 평판형으로 구분이 되며, 원통형 개질기의 열효율 및 유동특성에 관한 연구는 이전 연구에서 많은 성과가 있어²⁻⁵⁾ 실제 상용화된 연료전지 시스템에 많이 탑재 되고 있다. 하지만 평판형의 경우 공간 활용의 이점, 제작과정의 간소화, 유지보수의 편의성 등의 장점에도 불구하고 그 연구 성과가 미비한 것이 현실이다⁶⁾. 본 연구실에서는 현재 평판형 수증기 개질기 시작품의 설계, 제작과 함께 테스트스테이션을 구축하여 개질시스템의 개발

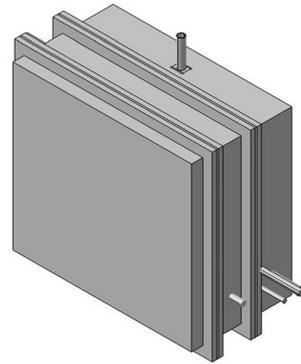


Fig. 1 The 3D model for plat type STR.

에 박차를 가하고 있다.

수증기 개질 반응은 흡열반응이므로 연소기에서 공급되는 열량 분포에 따라 그 성능이 좌우 된다⁷⁾. 따라서 본 연구에서는 제작에 필요한 평판형 개질기의 성능과 연소기 유로에 핀, 배플 등을 설치하여 개질기 성능 향상 가능성을 예측하였다. 이를 위해 개질기 내부의 열전달 및 온도 분포에 관한 수치해석을 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 3D 모델링

실험을 위해 설계, 제작된 평판형 개질기의 도면

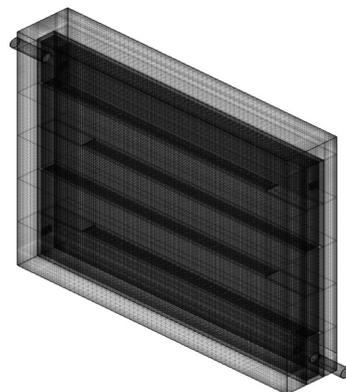


Fig. 2 Mesh with base model for analysis.

Table 1 Case description

Case Name	Case Number	Description
Base Case	1	Doesn't install anything in combustor
Add Baffle	2	Add the baffle in combustor. Baffle is installed in parallel with STR's baffle.
Add Fin	3	Install the fin on front wall of STR. Fin direction is parallel with combustion gas flow direction.
Add Dual	4	Install the baffle and fin together in combustor.

을 바탕으로 3D 모델링 프로그램인 CATIA V5를 이용하여 Fig. 1에 나타난 것과 같이 모델링 작업을 수행하였다. Fig. 1에 나타난 형상은 스팀 생산 및 개질연료 예열을 위한 열교환부까지 포함한 형상으로써 실제 수치해석에서는 Fig. 2와 같이 형상을 수정하여 열교환부를 제외한 연소기 및 STR 영역에 대하여 해석을 수행하였다.

2.2 형상 및 격자 생성

수증기 개질기 내부의 반응은 흡열 반응이므로 연소기에서 공급되는 열량 분포에 따라 그 성능이 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 연소기 내부 구조 변경을 통하여 STR부로의 열량 공급 형태를 변화시켜 개질기 성능 예측에 관한 해석을 수행하였다.

Fig. 2는 연소기 내부 형상 변화가 없는 기본 형태와 격자를 나타낸 것이다. 이와 같은 기본 형상에 핀, 배플 등을 설치하여 연소기 내부 형상을 변화시켰다. 연소기 내부 형상 변화를 통한 해석 case의 구분은 Table 1에 나타내었다.

흡열반응이 발생하는 STR부분의 경우 Fig. 3과 같이 사형 구조로 되어있으며 STR의 앞, 뒤 끝단부에 반응 가스의 혼합과 반응 후 가스의 맥동 방지를 위하여 chamber를 위치하였다.

수치해석을 수행함에 있어서 명확한 해의 도출 및 계산 시간 단축을 위하여 hexahedral 격자를 사용하여 격자를 구성하였으며, fin이 추가 되지 않은 case 1, 2의 경우 약 100만 개, fin이 추가된 case 3,

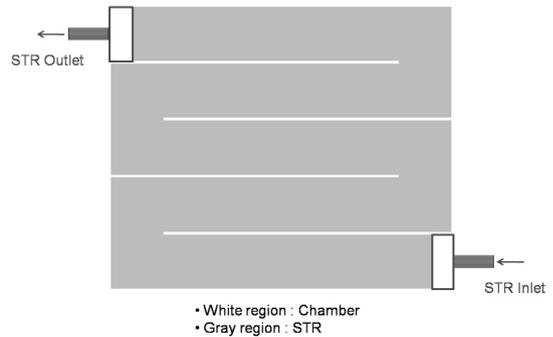


Fig. 3 Region definition of STR.

4의 경우에는 약 300만 개의 격자가 사용되었다.

2.3 해석 및 경계 조건

2.3.1 해석 조건

수치해석을 위해 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+ v4.02를 이용하였으며, 앞에서 밝힌 바와 같이 각 case 별로 100~300만개 가량의 격자를 사용하였다. 전체적인 연소기 및 STR 내의 유동 특성상 모든 case에서 난류 모델은 low reynolds standard k-ε model이 적용되었으며, 사용된 지배 방정식의 자세한 내용은 참고문헌⁸⁾을 참고하기 바란다. 계산의 수렴 판단 조건은 전체적인 계산 잔차가 1.0E-4 이하 일 경우 수렴하였다고 판단하였다.

2.3.2 경계 조건

Fig. 6에서 보는 바와 같이 연소기와 STR 부분의 입·출구는 따로 설정 되어 있으며, 개질기의 전체적 구조상 연소기 출구는 바닥면이 아닌 뒤편 벽에 설치되어있다. 해석영역 안쪽에 설치된 벽 및 핀, 배플 등은 모두 열전달을 고려하였으며, 최외곽 경계는 모두 단열조건을 상정하였다. 나머지 경계조건들 Fig. 6에 나타난 바와 같다.

연소기 내부의 화염형태가 예혼합 평면화염임을 고려하여 직접적인 연소반응을 해석하는 대신 연소 영역 입구 조건에 대하여 균일한 온도조건을 주었으며, 자세한 입·출구 조건은 Table 2에 나타내었다.

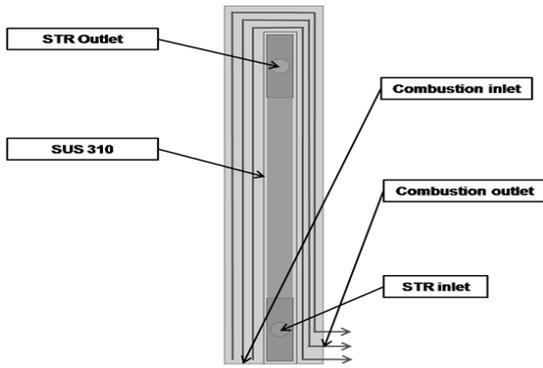


Fig. 4 Boundary definition.

연소기측 작동 유체의 경우 연소생성물의 혼합 물성치를 계산하여 조건을 상정하였다⁶⁾. STR 작동 유체 또한 필요 개질량에 따른 반응물의 혼합 물성치를 계산하여 조건으로 산정하였다. 그리고 전체적인 연소기 및 STR의 제작에는 SUS310이 사용되었으며 solid영역으로 처리하여 열전달 계산을 수행하였다. 이에 대한 자세한 물성치들은 Table 3과 Table 4에 표시하였다.

실질적으로 STR 내부에서는 수증기와 메탄, 촉매의 화학반응으로 인해 흡열반응이 일어나게 된다. 하지만 이러한 화학반응까지 고려하여 계산을 하게 되면 상당한 시간이 소요되므로 계산시간 단축을 위하여 STR부분에 촉매의 사양으로부터 계산되어진 아래의 식 (1)과 같은 흡열 source항을 열전달 방정식에 추가하여 흡열량을 고려하였다.

Table 2 Boundary condition

	Temperature	Velocity	Boundary Type
STR Inlet	723.15 K	7.830 m/s	Velocity Inlet
STR Outlet	.	.	Pressure Outlet
Combustor Inlet	1273.15 K	0.115 m/s	Velocity Inlet
Combustor Outlet	.	.	Pressure Outlet

Table 3 Properties of operating fluid

	STR	Combustor
Molecular Weight (g/mol)	17.086	29.072
Specific Heat (kJ/kg·K)	2.841	1.266
Dynamic Viscosity (Pa·s)	2.440E-05	4.94E-05
Thermal Conductivity (W/m·K)	0.083	0.077

$$-1.31e^{-4} \times 2(T^2) - 6.91e^{-1} - 3.65e^3 \quad (1)$$

STR 내부는 다공성 매질로 가정하였으며, 다공성 매질의 압력 강하 계산을 위하여 식 (2)와 같은 Ergun 식을 적용하였다¹⁾. 다공성은 0.5로 가정하였으며, 촉매 입자 하나의 직경은 2mm로 가정하였다.

$$\frac{\partial P}{\partial x_j} = -\frac{150\mu(1-x)^2u}{x^3D_p^2\phi_p^2} - \frac{1.75\rho(1-x)u^2}{x^3D_p\phi_p} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 연소기 출구측 평균 온도 비교

연소기 출구측 온도의 경우, 연소기 측에서의 열전달이 잘 일어날수록 STR부의 흡열반응이 활성화되어 온도가 낮아지게 된다. 이에 따라 각 case 별 연소기 출구측 온도를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보여진 바와 같이 case 3에서 가장 낮은 출구 온도를 보였다. 이는 case 3에서 STR부로 열전달량이 가장 많을 것임을 예상할 수 있다. 이에 반하여 연소기내 고온기류의 체류시간 연장 및 효과적인 열전달을 위하여 배플을 설치한 case 2와 4의 경우 오히려 출구측 온도가 상승하는 것을 볼 수

Table 4 Properties of SUS310

Density	7060 kg/m ³
Conductivity	16.2 W/m·K
Specific heat	499.87 J/kg·K

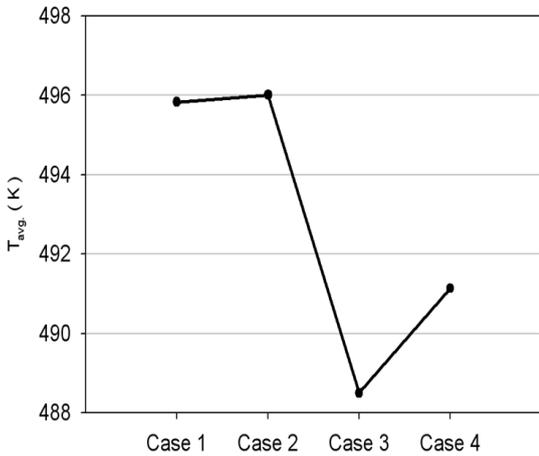


Fig. 5 Average temperature at combustor outlet.

가 있다.

3.2 열전달 비교

Fig. 6은 case 별 연소기에서 STR로의 열전달을 나타낸 것이다. 앞에서 예상한 바와 같이 case 3에서 가장 많은 열전달을 나타내고 있다. 핀과 배플을 동시에 설치한 case 4의 경우 case 3과 비교하여 오히려 열전달이 감소하는 것을 볼 수 있다.

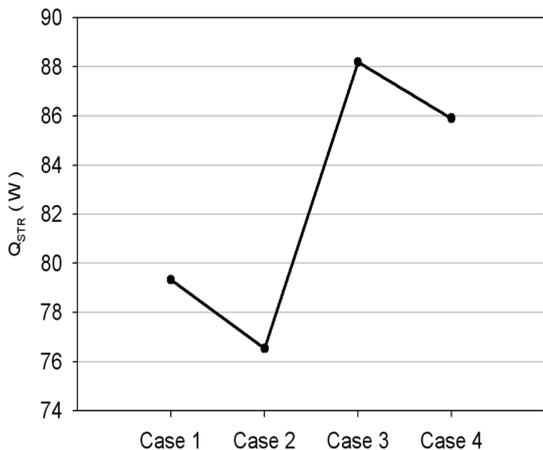


Fig. 6 Heat transfer at interface of STR and combustor.

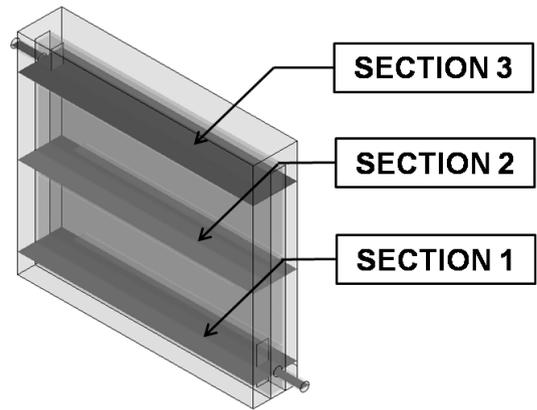


Fig. 7 Definition of section 1, 2, 3.

3.3 높이 방향 온도 분포 비교

연소기 및 STR부분의 온도 분포 비교를 위하여 Fig. 7와 같이 연소기와 STR부분, solid영역이 포함된 전체 해석영역에 대하여 상, 중, 하 세 개의 section으로 구분 하였다.

Fig. 8에서 Fig. 10까지에서 나타난 바와 같이 배플이 추가된 해석 case에서 연소기 유로가 배플에 의해서 꺾이는 지점에 유동 흐름의 지체가 발생하고 배플의 영향으로 인해 고온 기류가 상층부까지 제대로 이동하기 못하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 배플에 의한 유동 흐름의 지체로 인하여 열량 분

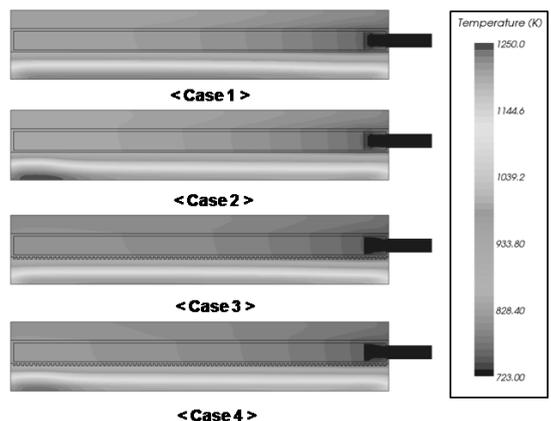


Fig. 8 Temperature distribution at section 1.

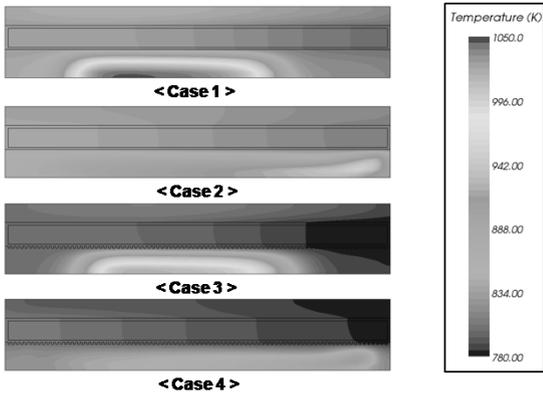


Fig. 9 Temperature distribution at section 2.

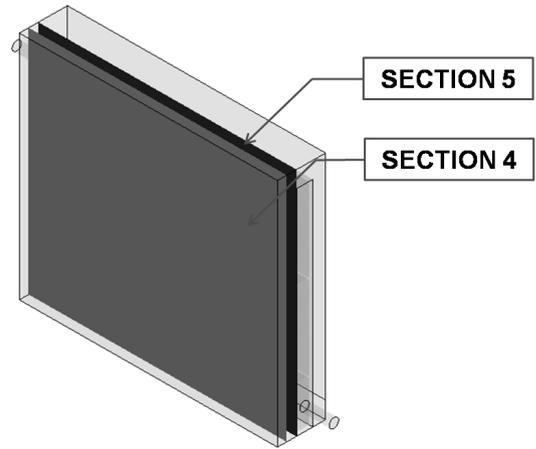


Fig. 11 Definition of section 4, 5.

포가 전체 영역으로 고르게 일어나지 못하고, 이에 따라 특정 부위에 열량이 집중, STR 한계 흡열량 초과로 인해 흡열되지 못한 열량이 연소기 측으로 다시 열전달 되어 빠져 나가는 것으로 보인다. 이러한 현상으로 인해 배플이 추가된 케이스에서 열전달이 낮게 나타나는 것이라 생각된다. 또한 이러한 고온 기류의 정체는 열응력 집중을 발생시켜 구성품의 내구도 감소를 야기할 수 있다. 이러한 부분들은 다음에 살펴볼 연소기 단면 온도 분포에서 더욱 두드러지게 나타난다.

3.4 연소기측 온도 분포 비교

Fig. 11에 나타낸 바와 같이 X축에 수직한 방향

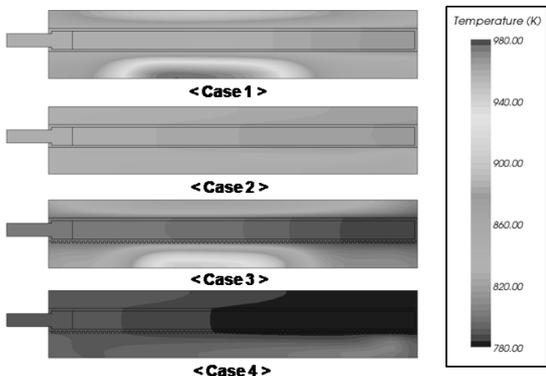


Fig. 10 Temperature distribution at section 3.

으로 연소기 입구측 중앙과 solid영역 전면부에서 0.1mm 떨어진 부분에 section을 생성하였다.

Section 4에서의 온도분포를 Fig. 12에 나타내었다. 배플이 없는 case 1과 case 3의 경우에는 고온기류가 상단부까지 원활이 이동하는 것을 알 수가 있다. 또한 배플이 없는 경우에 있어서 온도 분포가 종형의 형태를 띠는 것을 알 수가 있는데, 이는 벽면

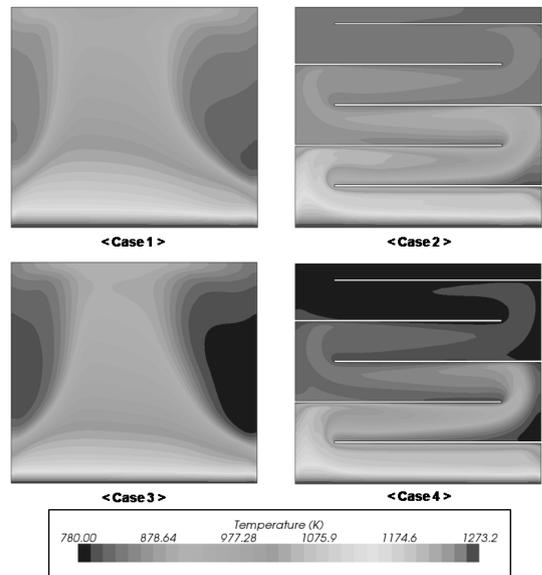


Fig. 12 Temperature distribution of section 4.

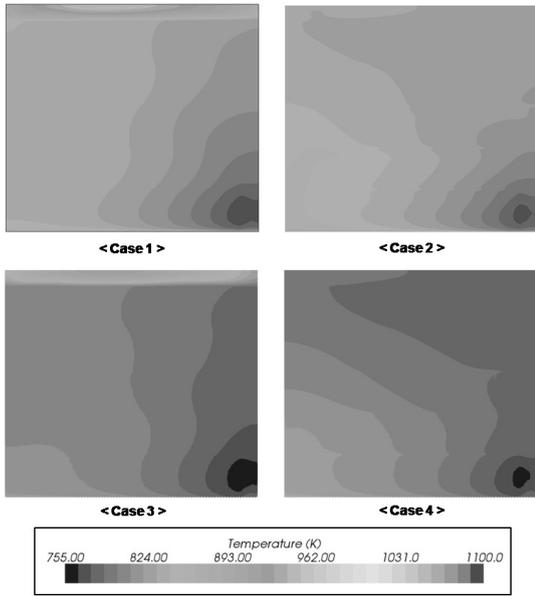


Fig. 13 Temperature distribution of section 5.

조건에 의하여 벽쪽의 유속이 느려지는 데다 STR 자체의 사형 구조에 따라 흡열이 가능한 STR 면적이 양쪽 끝의 굽어지는 부분에서 다른 부분에 비해 넓어지므로 이러한 양쪽 끝 벽면부에서 흡열이 많이 일어나 발생하는 현상이라 여겨진다. 또한 핀이 설치된 case 3과 case 4의 경우 case 1과 case 2에 비하여 온도 분포가 상대적으로 낮은 부분이 많은 것을 알 수 있는데, 이는 핀 설치에 의한 열전달 효과 상승이라 여겨지며, 이러한 온도 분포는 앞의 결과들을 잘 설명해 주는 것이라 할 수 있을 것이다.

Section 5에서의 온도 분포를 나타낸 Fig. 13에서도 역시 이전과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 앞에서와 마찬가지로 핀이 설치된 case에서 전반적인 온도 분포가 낮게 나타나고 있으며, 다만 solid영역의 열전달 효과로 인하여 각 부분의 온도차는 크지 않은 편이다. 또한 STR 입구 부분에서 많은 흡열이 일어나는 것을 알 수 있다.

3.5 Solid 영역 표면 온도 분포

Fig. 14에서 각 case 별 solid 영역의 표면 온도

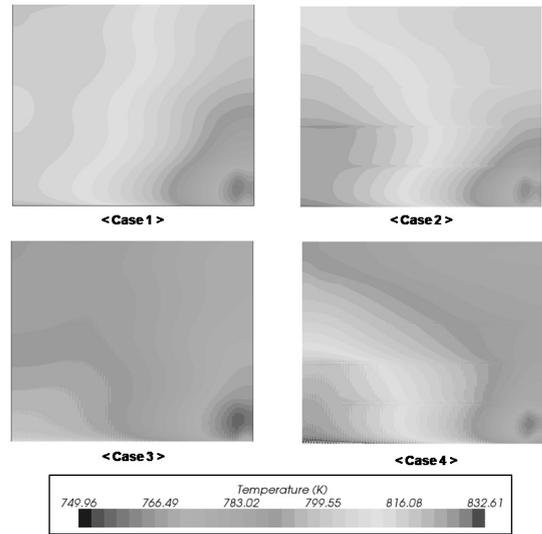


Fig. 14 Temperature distribution of solid surface.

분포를 나타내었다. 역시나 앞의 결과와 마찬가지로 비슷한 온도 분포의 경향을 나타내고 있으며, 핀을 설치한 경우가 전반적으로 고른 온도 분포를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 앞에서 밝힌 바와 같이 case 2와 case 4처럼 열이 한곳에 집중되는 경우 여러 가지 문제점을 야기할 수 있기 때문에 case 3과 같이 고른 온도 분포를 보이는 것이 바람직하다고 생각된다.

3.6 STR 온도 분포 비교

Fig. 15에 표시한 것과 같은 STR부의 단면, section

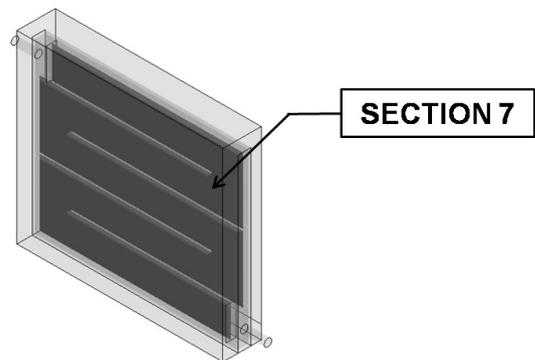


Fig. 15 Definition of section 7.

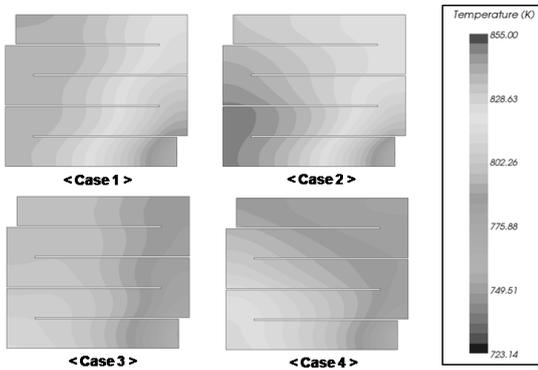


Fig. 16 Temperature distribution at section 7.

7에 대한 온도 분포를 Fig. 16에 나타내었다.

유체가 흐를 때, 저항이 낮은 쪽으로 흐르는 현상을 채널링이라 하며, STR 내부는 등방성 다공매질로 가정하였기 때문에 유동의 형태가 변화하는 사형 구조의 굽어지는 부분에서 저항이 증가하여 작동유체의 정체가 발생하게 된다. Fig. 16에서 보인바와 같이 기본형인 case 1에서는 위에서 설명한 채널링 효과로 인해 STR 내부에서 흡열반응한 작동유체가 정체하게 되면서 상대적 고온영역이 좌측에 치우치게 되는 현상을 나타내고 있다. 또한 case 2에서는 배플에 의한 고온 기류 정체로 인해 STR내에서의 온도 분포가 균일하지 못한 것을 볼 수 있다. 이에 반해 핀이 추가된 case 3과 case 4는 STR 전구간에서 비교적 균일한 온도 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 핀에 의한 효과라 여겨지며, STR 전구간에서 균일한 흡열 반응이 일어남을 의미한다. 하지만 case 4에서는 배플의 영향으로 인해 고온 기류 집중부가 나타나고 앞서의 결과처럼 전체적인 열전달이 감소하게 된다. 하지만 이러한 결과들은 유동과 결합된 가스의 화학반응에 의한 흡열이 아닌, 에너지 방정식에 추가된 source항을 이용한 계산결과이다. 그러므로 유동 흐름이 계산 전체에 많은 영향을 끼치게 된다. 따라서 추후에 화학반응을 고려한 계산이 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 수치해석을 통하여 설계를 위한 평판형 수증기 개질기의 성능을 예측하고, 연소기 내부의 유로 형태를 변경하여 성능 향상의 가능성을 가능하였다. 이러한 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연소기 내 유로의 변화가 없는 기본형의 경우 STR 내부에서 채널링 현상이 발생하는 것으로 미루어 STR 내부로의 효과적인 열전달이 일어나지 못하고 있다.
- 2) 배플을 설치하는 경우, 고온 기류 집중 현상에 의해 고온 열전달이 일어나지 못하여 STR부로의 열전달이 감소하게 되며 또한 열응력 집중에 의해 부품 내구성문제가 야기될 가능성이 있다.
- 3) 핀을 설치하여 STR 전구간에 비교적 균일하게 열전달이 가능하며, 이로부터 STR벽면부의 핀 설치가 효율 향상에 도움이 됨을 예측할 수 있었다.
- 4) 열전달 계산에 source항을 적용하여 흡열반응을 계산하였지만, 실질적인 화학 반응에 의한 계산이 아니기 때문에 추후 정확한 계산을 위하여 화학반응의 고려가 필요하다.

이와 같은 결과로부터 평판형 개질기의 연소기 유로 형태 변화를 통하여 성능 향상의 가능성을 예측할 수 있었다. 본 해석 조건에서는 일반적인 생각과 달리 배플 설계가 잘못되면 오히려 성능이 떨어지는 문제점이 발견되었다. 이에 따라 성능 향상을 위하여 배플을 설치하고자 한다면 더욱 다양한 설계변경을 통한 추후 연구가 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- 1) 박준근, 이신구, 임성광, 배중면, “천연가스로

- 부터 수소를 생산하기 위한 수증기 개질기의 작동조건과 형상에 대한 수치해석 연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제33권, 제1호, 2009, pp. 60-67.
- 2) 이경호, 권오채, “연료전지용 컴팩트형 개질기의 고성능화를 위한 고온 공기 연소 기술의 적용에 관한 연구”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제16권, 제3호, 2005. 9, pp. 229-237.
 - 3) 오영삼, 송택용, 백영순, 최리상, “컴팩트형 수증기 개질장치 효율분석”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집(2002. 12), 제13권, 제4호, pp. 313-321.
 - 4) 이명용, 이지홍, 이상석, 이진석, 이도형, “다양한 형태의 버너를 이용한 수증기개질기의 고효율화 연구”, 대한기계학회 2008년도 추계학술대회, 2008.11, pp. 2886-2791.
 - 5) 최종균, 정태용, 남진현, 신동훈, “수증기-메탄개질반응 해석모델의 비교연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제32권, 제7호, 2008, pp. 497-503.
 - 6) 오영삼, 백영순, “수소스테이션용 20 Nm³/hr 급 수소제조장치 개발”, 제17권, 제3호, pp. 263-271.
 - 7) 이명용, 이지홍, 김헌주, 이상석, 이도형, “연소가스 유동형태의 변화에 따른 메탄 수증기 개질기 표면온도 특성 평가”, 한국마린엔지니어링학회 2009년도 공동학술대회 논문집, 2009.6, pp. 177-180.
 - 8) STAR-CCM+ methodology : CD-adapco Group, <http://www.adapco.com>