

# 연료전지 개질기용 증발기 열교환 성능을 위한 증발기 형상에 관한 연구

## A Study on the Evaporator Shape for the Heat Transfer Performance of Fuel Cell Reformer

서호철<sup>1,✉</sup>, 김규준<sup>1</sup>, 노형철<sup>1</sup>, 박경석<sup>2</sup>  
Ho Cheol Suh<sup>1,✉</sup>, Kyu Jun Kim<sup>1</sup>, Hyung Chul Noh<sup>1</sup> and Kyoung Suk Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 세종공업주 (Sejong Industrial Co., LTD.)

<sup>2</sup> 경희대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyunghee Univ.)

✉ Corresponding author: hcsuh@sjku.co.kr, Tel: 070-7733-1504

Manuscript received: 2010.9.13 / Revised: 2010.11.12 / Accepted: 2010.11.17

*Steam reformer was organized with steam reforming process and CO removing process. The steam reforming process needed high temperature, 600~900 °C, for catalytic-reaction which was extract of hydrogen from steam and hydrocarbon. The effects of the evaporator configuration on its heat transfer characteristics were investigated both experimentally and numerically to pursue the miniaturization. In this study, three configurations were considered where the different structures were tested; empty, embossing and mesh filled. For the comparison of heat transfer performance of shape evaporator disk, numerical analysis using SC-Tetra code and experiment were carried out. In case of reformer system design, it should be considered heat transfer rate, differential pressure and fluid flow direction.*

Key Words: Steam Reformer (수증기 개질기), Evaporator (증발기), Heat Transfer (열전달), Hydrocarbon (탄화수소), Fuel Cell (연료전지)

### 1. 서론

최근 미래에너지로 부각되는 수소 제조 기술로는 화석연료의 수증기 개질, 부분산화, 자열 반응, 열분해, 플라즈마 개질 등과 더불어 대체에너지를 활용한 물의 전기분해, 광화학적 또는 생물학적 수소제조방법이 있으며 원자력에너지를 활용하여 물을 전기분해 하거나 열화학적 방법에 의해 수소를 제조하는 방법이 있다. 그 중 수증기 개질 방식을 이용하는 스팀리포머는 고비용, 소형화 및 빠른 시동성, 다양한 연료 사용에 한계를 나타내고 있지만 높은 리포밍 효율을 얻을 수 있는 장점

으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다. 스팀리포머는 스팀리포밍 공정과 CO 제거 공정으로 구성되어 있다. 스팀리포밍 공정은 수증기와 탄화수소 분자에 포함된 수소를 추출하는 공정으로 촉매 반응을 위해서는 650~900 °C의 높은 온도가 필요하며 흡열반응을 나타낸다. 반응을 위한 열은 버너에서 연소되는 열을 직접 이용하며 수증기는 버너 연소 배기가스 열을 활용하여 물을 기화시켜 공급한다.

최근 개질기에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으며 질소 산화물 저감에 대한 연구,<sup>1</sup> MEMS 공정을 이용한 개질기,<sup>2</sup> 개질기의 열유속에 대한 수

치해석,<sup>3</sup> 유로 채널 성형시 정밀도 평가,<sup>4</sup> 연료전지 시스템의 열역학적 성능 해석,<sup>5</sup> 가스 조성에 따른 반응기의 거동 특성에 관한 연구<sup>6</sup>가 보고되고 있다. 그러나 개질기는 연료 효율과 장치 성능을 높이기 위해 증발기를 추가적으로 구비할 필요가 있는데 이에 대한 연구는 미비한 상황이다.

이 경우, 증발기는 외부에서 유입되어 증발기 안으로 흐르는 액상의 연료를 증발시키기 위하여 연료개질기의 부피에 비해 상대적으로 긴 채널을 구비하게 되며 이로 인해 부피가 커진다. 따라서 증발기를 소형화하는 경우, 길이가 길고 복잡한 형상의 채널로 인하여 증발기 제조가 어려워진다.

이에 본 연구에서는 소형화하기 위한 증발기 형상의 단순화 모델을 수치 해석을 통해 제안하고 실험을 통해 증발기 형상에 따른 열교환 특성을 고찰하고자 한다.

2. 이론

증발기 내부유체의 유동에 대한 수치계산은 3 차원 정상상태로 가정하여 수행되었다. 내부 유동장의 수치해를 얻기 위해 standard k-ε 난류 모델을 적용하였다. Standard k-ε 난류 모델은 난류 유동해석에 주로 쓰이고 있는 모델로서 시간변화에 따른 와류점성(eddy-viscosity) 특성과 레이놀즈 수가 높은 유동의 특성을 보다 정확하게 예측한다. 본 연구에서는 열교환기 내부로 유입되는 유체 및 해석 대상 모델 내부의 구조, 열유동 조건을 고려하여 물리적으로 적절한 수치해를 얻고자 열교환기 내부유동에 대하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 유체의 열역학적 물성치(밀도, 점성계수, 열전도도)는 온도에 대하여 일정하다.
- 2) 유로에서의 유동분산은 모든 채널에서 동일하다.
- 3) 열교환기 주위로 열손실은 없다고 가정한다.
- 4) 중력의 영향은 무시한다.

연속방정식, 운동량방정식, standard k-ε 난류방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -\overline{\rho u_i u_j} \right) \tag{2}$$

여기서,

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}$$

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3}$$

표준 k-ε 난류 모델

난류운동에너지(k) 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \tag{4}$$

난류 운동에너지 소산율(ε) 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

여기서  $\sigma_k$  및  $\sigma_\varepsilon$ 은 각각 k 및 ε의 난류 확산에 관한 프란틀 수이다.  $G_k$ 는 난류 운동에너지에 의한 생성항을 의미한다. 즉,

$$G_k = \mu_i \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{6}$$

이다.

연료개질기의 증발기 열교환 특성을 고찰하기 위하여 고온부와 저온부의 열전달량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \tag{7}$$

여기서,  $\dot{m}$  : 질량유동률

$c_p$  : 정압비열

$\Delta T$  : 입구온도와 출구온도 차이

Table 1 Experimental conditions of heat source

	Case 1	Case 2	Case 3
High Temperature Heat Source Air Flow Rate [lpm]	30	30	30
Low Temperature Heat Source Air Flow Rate [sccm]	500	500	500
Low Temperature Heat Source Water Flow Rate [sccm]	1.0	2.0	3.0

상기 수식을 이용하여 스팀리포머 작동조건을 모사하여 Table 1 과 같이 스팀리포머 증발기에 고열원 Heat Source 가스 유량 조건이 주어졌을 때 저열원으로 공급되는 스팀리포밍을 위한 물과 공기로 전달되는 열전달량을 도출할 수 있었다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 해석모델

본 장에서는 스팀리포머의 증발기 열적 특성을 분석하기 위하여 적용된 해석모델은 Fig. 1 과 같은 형상을 나타낸다. 저열원 디스크와 고열원 디스크의 복수 평판형 플레이트가 일정한 간격으로 이격되어 구성된 Based 모델과 열교환 성능 증대를 위해 Mesh 등의 유동 저항체가 플레이트 사이에 적용된 Meshed 모델의 형상은 Fig. 1(a)와 같다. 유동 저항체를 제거하여 조립을 단순화하며 열교환 성능 향상을 위해 플레이트에 엠보싱 형상을 적용한 Embossed 모델의 형상은 Fig. 1(b)와 같다.

스팀리포머 증발기에서 증발기 내부 형상에 따른 열전달 문제를 분석하기 위하여 상용코드인 SC-Tetra 를 이용하여 CFD 해석을 수행하였다. 스팀리포머 증발기에 대한 유동장 해석을 위한 난류 모델은 k-ε 모델을 사용하였다.

해석에 적용된 모델은 계산 시간 단축과 정확도를 높이기 위하여 저열원의 증발기 디스크 1 개의 층을 대상으로 수행하였다. 이때 사용된 격자 수는 각 모델에 따라 151 만개~159 만개이며 Tetra mesh 를 사용하였다.

본 해석을 통하여 증발기 내부 형상에 따른 열전달 특성을 분석하여 압력 분포 특성을 통하여 리포머 시스템 장착시 발생할 수 있는 압력 손실 특성에 대하여 고찰하고자 하였다.

#### 3.2 경계조건

유동장 해석에 사용된 경계조건은 저열원과 고열원 각각의 유체에 대하여 공급유량과 온도를 설정하였다. 저열원 작동 유체는 Air 를 적용하였으며, 공급 온도 80 °C, 공급 유량 500 sccm 의 조건이며 저열원의 출구는 대기압으로 설정하였다. 고열원 작동유체의 고온층은 550 °C, 저온층은 200 °C 의 조건을 부여하였다.

벽면 경계조건은 Stationary wall 과 Non-slip condition 을 적용하여 해석의 정확도를 높이고자 하였다. 또한 Meshed model 의 경우 Mesh 와 같은 효과를 부여하기 위해 Porous media 를 적용하여 디스크 내부에는 작은 particle 이 존재하여 실제 환경과 유사하게 적용하였다.

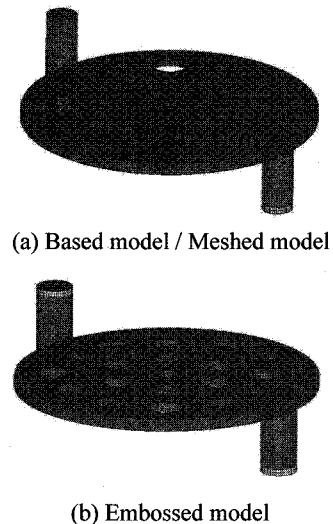


Fig. 1 A grid system of the steam reformer evaporator

#### 3.3 해석 결과

Fig. 2 는 증발기 중심에서 축방향으로 단면의 온도분포를 나타낸 것이다.

Based model 의 경우 입·출구의 온도차는 87 K 이 계산되었으며 Embossed model 의 경우 입·출구의 온도차는 157 K 이 계산되었다. Meshed model 의 경우 입·출구의 온도차는 168 K 이 계산되었다. 이는 실제 증발기 열교환 조건인 저열원측으로 액체 상태의 물 공급은 고려되지 않았지만 Embossed model 의 경우에도 Meshed model 의 열교환 성능과 유사하다는 결과를 얻을 수 있었다.

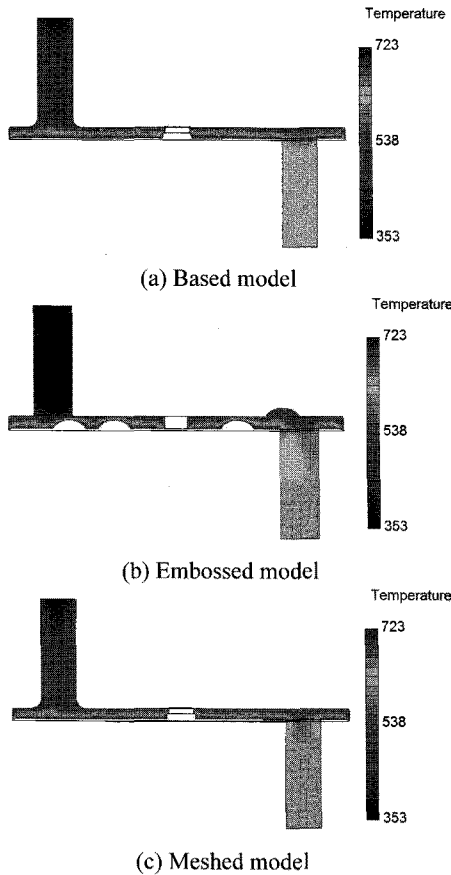


Fig. 2 The temperature distribution of a longitudinal cross section

Fig. 3 은 증발기 중심에서 축방향으로 단면의 압력 분포를 나타낸 것이다. Based model 의 경우 입·출구의 압력차가 0.07 Pa 이 계산되었으며 Embossed model 의 경우 입·출구의 압력차는 0.08 Pa 이 계산되었다. Meshed model 의 경우 입·출구의 압력차가 2.9 Pa 이 계산되었다. 이는 실제 증발기 열교환 조건인 저열원측으로 액체상태의 물 공급은 고려되지 않았지만 Embossed model 의 경우에도 증발기 열교환 플레이트에 저항체가 없는 Based model 과 유사한 압력 손실 특성을 나타내었으며 리포머 시스템 장착시에는 유동 저항에 따른 압력 손실이 개선될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 실험 장치 및 실험 결과

##### 4.1 실험 장치

스팀리포머용 증발기 형상에 따른 열교환 특성을 고찰하기 위하여 성능 평가 장치는 Fig. 4 와 같

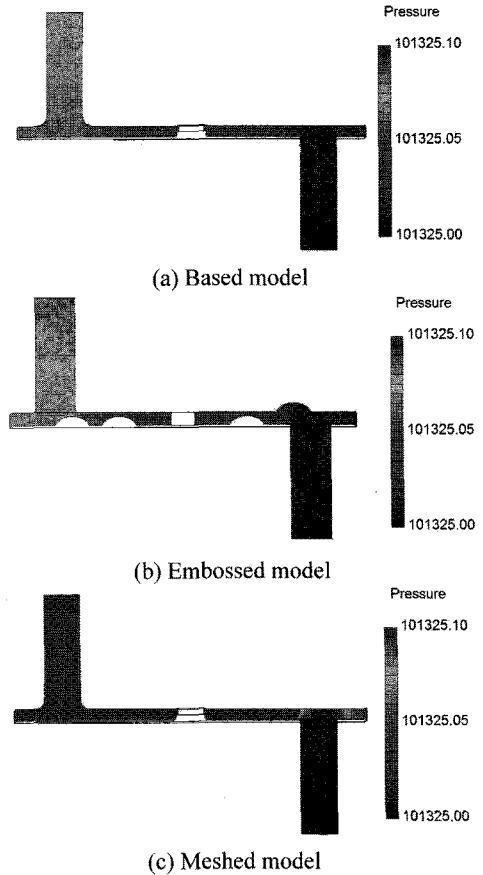


Fig. 3 The pressure distribution of a longitudinal cross section

이 구성하였다. 스팀리포머 운전 환경 모사를 통한 평가 결과의 신뢰성 확보를 위하여 고열원의 가스 유량 및 온도는 MFC 와 1 kW 가스 프리 히터를 적용하였다. 저열원의 물은 HPLC 펌프와 Line 히터를 적용하여 유량 및 온도를 제어하였으며 저열원의 공기는 MFC 와 Line 히터를 적용하였다.

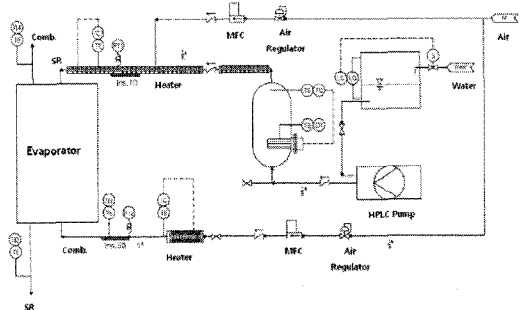


Fig. 4 Experimental set up for evaporator performance test

### 4.2 실험 방법

증발기의 사용 환경에 따른 열교환 성능 평가를 위하여 고열원의 입·출구 가스 온도와 저열원의 입·출구 가스 온도를 측정하였으며 증발기 내부 형상에 따른 열교환 성능 평가를 위하여 실험에 사용된 시제품 모델 3 가지는 Fig. 5 와 같이 제작하였으며 작동 유체의 흐름은 Top to Bottom 의 조건으로 수행하였다.

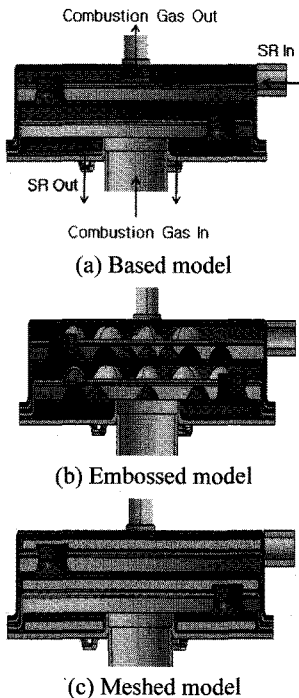


Fig. 5 Evaporator shape at top to bottom flow condition

증발기의 열교환 성능 개선을 위하여 저열원의 입·출구 위치 변경을 통한 특성 평가를 위한 모델 3 가지를 Fig. 6 과 같이 제작하였다. 작동유체가 흐르는 유로는 고열원과 저열원의 유동이 Normal flow 로 흐를 수 있도록 설계하였으며 저열원의 작동유체의 흐름은 Bottom to Top 의 조건으로 수행하였다.

시제품 실험 평가 조건은 수치 해석의 조건과 유사하게 수행하였다. 고열원은 Air, 550 °C, 30slpm 의 조건으로 공급하였으며, 저열원의 작동 유체는 Air, 80 °C, 500 sccm 의 조건과 Water, 80 °C, 1 sccm, 2 sccm, 3 sccm 의 조건별로 개질기용 증발기의 열교환 성능 특성을 분석하였다.

본 실험을 통하여 작동 유체가 Top to bottom

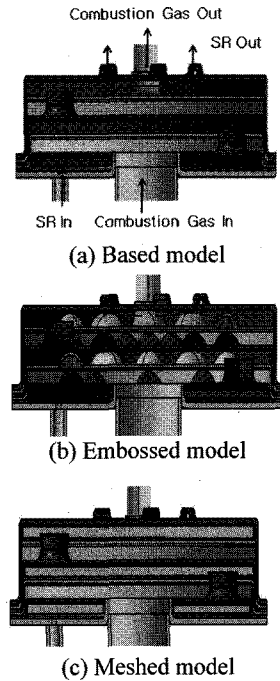


Fig. 6 Evaporator shape at bottom to top flow condition

flow 조건에서 수치 해석 결과에 대해 개질기용 증발기의 사용 환경을 모사하여 작동 유체 흐름 조건별 열교환 특성에 대해 비교 평가하고자 하였다.

### 4.3 실험 결과

스팀리포머용 증발기의 열교환 특성을 나타내기 위하여 고열원측으로부터 저열원측으로의 열전달량을 도출하였다.

Fig. 7 은 수치해석을 통해 얻은 저열원측 열전달량과 작동 유체의 흐름이 Top to bottom 인 경우 실험을 통해 얻은 증발기 내부 형상별 저열원측의 열전달량을 나타낸 것이다.

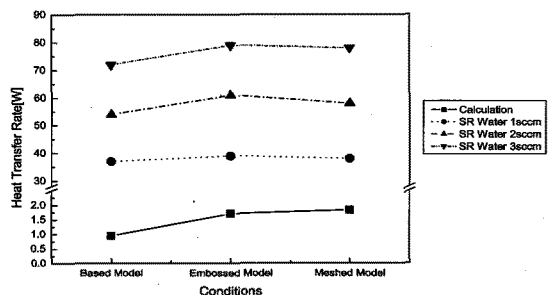


Fig. 7 Heat transfer rate of low temperature heat source at top to bottom flow condition

증발기 내부 형상이 평판 플레이트 형으로 구성된 Based model 의 경우 열전달량은 저열원측 Water 유량이 1 sccm 인 경우 약 37 W 가 측정되었으며, 저열원측 Water 유량이 3 sccm 인 경우 약 72 W 가 측정되었다. 증발기 내부 형상이 Embossed model 인 경우 열전달량은 SR Water 유량이 1 sccm 인 경우 약 37 W 가 측정되었으며, 저열원측 Water 유량이 3 sccm 인 경우 약 79 W 가 측정되었다. 증발기 내부에 열교환 향상을 위해 저항체로서 Mesh 가 적용된 Meshed model 의 경우 열전달량은 저열원측 Water 유량이 1 sccm 인 경우 약 38 W 가 측정되었으며, 저열원측 Water 유량이 3 sccm 인 경우 약 78 W 가 측정되었다.

열전달 특성 평가 결과 플레이트 단면적을 증대시킨 Embossed model 의 경우 Based model 대비 수치해석에서는 약 90 % 이상의 열전달 개선 효과가 나타났으며 실험 평가에서는 약 10 %의 열전달 개선 효과를 나타내었으며 Mesh 적용 시제품과는 유사한 경향을 나타내었다. 수치해석 결과와 실험 평가 결과가 동일한 경향을 나타내었지만 결과 수치에서 상이한 것은 실험 평가는 저열원 측 디스크 3 개의 열전달량의 합산으로서 저열원 측으로 Water 공급으로 인한 열교환이 고려되었지만 수치해석에서는 해석 시간의 단축과 해석 결과의 정확한 경향 분석을 위해 저열원 측으로 Water 공급이 고려되지 않았으며 디스크 1 개의 열전달량만을 계산하였다.

Fig. 8 은 작동 유체의 흐름이 Bottom to top 으로 유로를 개선한 시제품의 증발기 내부 형상에 따른 저열원측의 열전달량을 나타낸 것이다.

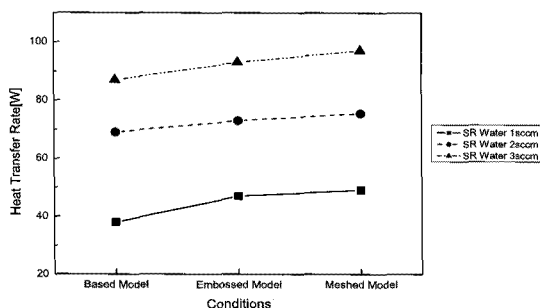


Fig. 8 Heat transfer rate of low temperature heat source at bottom to top flow condition

증발기 내부 형상이 평판 플레이트 형으로 구성된 Based model 의 경우 열전달량은 저열원측

Water 유량이 1sccm 인 경우 약 38 W 가 측정되었으며, 저열원측 Water 유량이 3 sccm 인 경우 약 87 W 가 측정되었다. 증발기 내부 형상이 Embossed model 인 경우 열전달량은 저열원측 Water 유량이 1 sccm 인 경우 약 47 W 가 측정되었으며, 저열원측 Water 유량이 3 sccm 인 경우 약 93 W 가 측정되었다. 증발기 내부에 열교환 향상을 위해 저항체로서 Mesh 가 적용된 Meshed model 의 경우 열전달량은 저열원측 Water 유량이 1 sccm 인 경우 약 49 W 가 측정되었으며, 저열원측 Water 유량이 3 sccm 인 경우 약 97 W 가 측정되었다.

열전달 개선을 위해 작동 유체의 흐름을 Bottom to top 으로 변경된 시제품의 경우 Top to bottom 의 경우에 비해 저열원측 Water 유량에 따라 최대 20 % 이상의 열전달 개선 효과가 나타났다.

## 5. 결론

증발기 형상의 단순화 모델에 대한 열특성을 수치 해석을 통해 검증하였으며, 열전달 특성 평가를 통해 증발기 형상 및 작동 유체의 흐름 방향에 따른 열교환 특성을 아래와 같이 도출하였다.

1) 개질기용 증발기 작동유체의 흐름이 Top to bottom 의 경우에 대한 수치 해석을 수행하였으며 열교환 성능 개선을 위해 열전달 면적을 증대시킨 Meshed model 에서 가장 큰 열전달 특성을 나타내었으나 압력 손실 특성에 대해서는 Embossed model 과 Based model 의 경우에서 낮은 압력 손실 특성을 나타내었다.

2) 열전달 특성 평가 결과 작동유체의 흐름이 Top to bottom 의 경우 Embossed model 에서 가장 높은 열전달 특성을 나타내었으며, 작동유체의 흐름이 Bottom to top 의 경우 Meshed model 에서 가장 높은 열전달 특성을 나타내었다. 또한 작동유체의 흐름에 따라 약 20% 이상의 열전달 개선효과를 나타내었다.

## 후 기

본 연구의 공동저자는 2009 년 연구년 기간부터 참여되었으며, 도움을 준 경희대학교에 사의를 표합니다.

## 참고문헌

1. Lee, J. S. and Kim, N. Y., "Characterization of SCR System for NOx Reduction of Dielsel Engine(Ⅱ)," J. of KSPE, Vol. 25, No. 11, pp. 83-89, 2008.
2. Lee, H. R., Gil, J. H., Kim, S. H., Ha, J. W., Jang, J. H. and Kundu, A., "Characterization of Micro Reformer for RHFC Applications," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 545-546, 2006.
3. Bae, B. H., Sohn, J. L. and Ro, S. T., "Thermodynamic Performance Analysis of the Solid Oxide Fuel Cell System Including Reformer," Proc. of KSME Fall Annual Meeting, pp. 2412-2416, 2002.
4. Lim, S. K., Bae, J. M. and Nam, S. W., "Study on Basic Characteristics of Natural Gas Autothermal Reformer for Fuel Cell Applications," Trans. of KSME(B), Vol. 30, No. 9, pp. 850-857, 2006.
5. Park, J. G., Lee, S. K., Bae, J. M. and Kim, M. J., "Numerical Study on the Performance and the Heat Flux of a Coaxial Cylindrical Steam Reformer for Hydrogen Production," Trans. of KSME(B), Vol. 33, No. 9, pp. 709-717, 2009.
6. Park, D. S., Seong, E. J., Han, J. Y. and Hwang, S. S., "Accuracy Estimation in Fabrication of Fluid Passage Channel for Fuel Processor," Proc. of KSME Spring Annual Meeting, pp. 574-580, 2006.