

## 고압형 메탄올 수증기 개질기 압력용기의 내부 유동 개선을 위한 전산 해석

유동진<sup>1</sup> · 지현진<sup>2</sup> · 유상석<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>국방과학연구소, <sup>3</sup>충남대학교 기계공학부

### Computational Analysis for Improving Internal Flow of High Pressure Methanol Steam Reformer Pressure Vessel

DONGJIN YU<sup>1</sup>, HYUNJIN JI<sup>2</sup>, SANGSEOK YU<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

<sup>2</sup>Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35-44, Daejeon 34186, Korea

<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

†Corresponding author :  
sangseok@cnu.ac.kr

Received 28 August, 2020

Revised 11 October, 2020

Accepted 30 October, 2020

**Abstract** >> A reformer is a device for producing hydrogen used in fuel cells. Among them, methanol steam reformer uses methanol as fuel, which is present as a liquid at room temperature. It has the advantage of low operating temperature, high energy density, and high hydrogen production. The purpose of this study is to improve the internal flow of the pressure vessel when a bundle of methanol steam reformer in the pressure vessel goes out to a single outlet. An analysis of equilibrium reaction to methanol steam reforming reaction was conducted using Aspen HYSYS<sup>®</sup> (Aspen Technology Inc., Bedford, USA), and based on the results, computational analysis was conducted using ANSYS Fluent<sup>®</sup> (ANSYS, Inc., Canonsburg, USA). For comparison of the results, the height of the pressure vessel, outlet diameter, and fillet was set as variables, and the optimum geometry was selected by comparing the effects of gravity and the amount of negative pressure.

**Key words** : Computational analysis(전산 해석), Reformer(개질기), Methanol(메탄올), Recirculation zone(재순환 영역), Negative pressure(부압)

### Nomenclature

D: 출구 직경 [mm]

H: 압력용기 높이 [mm]

R: 필렛 반지름 [mm]

x: 축 방향

P: 정압 [Pa]

$\bar{\tau}$ : Stress tensor

G<sub>k</sub>: 평균 속도 구배로 인한 난류 운동 에너지 생성량

$G_b$ : 부력에 의한 난류 운동 에너지 생성량

$Y_M$ : 난류에서 변동 팽창이 전체 소산 속도에 미치는 영향

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ : Prandtl 수

## 1. 서론

현재 인류가 주로 사용하고 있는 화석 연료의 경우 자원이 한정되어 있다는 점, 대기오염과 지구 온난화 등의 환경 문제를 일으킨다는 점 등으로 사용이 제한되고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 자원이 풍부하며, 환경오염을 줄일 수 있는 신재생 에너지에 대한 활발한 연구들이 세계적으로 진행되고 있다.<sup>1,2)</sup> 그중 연료의 화학 에너지를 전기 에너지로 직접 변환시키는 연료전지<sup>3)</sup>는 열 혹은 운동 에너지로 인한 에너지 손실을 발생시키는 종래의 발전 방식에 비해 높은 효율을 가지고 있으며<sup>4)</sup>, 환경오염 물질의 배출이 적다는 장점을 가지고 있다<sup>5)</sup>.

대부분의 연료전지는 수소를 연료로 사용하며<sup>6,7)</sup>, 수소는 물에서 얻을 수 있어 풍부하고 에너지 저장과 이송이 가능하다는 장점을 가지고 있다<sup>8,9)</sup>. 하지만 수소는 자연에서 직접 얻을 수 없는 2차 에너지로, 연료전지에 사용되는 수소를 양산하기 위해선 개질기(reformer)가 필요하다. 개질기는 사용하는 연료에 따라 메탄, 메탄올, 에탄올 등 그 종류가 다양하며, 그중에서도 메탄과 메탄올이 주로 사용되고 있다<sup>10)</sup>. 메탄올 개질기의 경우, 메탄 개질기에 비해 작동 온도가 낮아<sup>11,12)</sup> 발전 장치의 열적 피로를 감소시킬 수 있으며, 별도의 연소기가 필요하지 않다는 장점을 가지고 있다. 또한 상온에서 액체 상태로 존재하여 에너지 밀도가 높아 많은 양의 연료를 저장 및 수송할 수 있으며<sup>13)</sup>, 수성가스 전환 반응을 통해 일산화탄소가 감소하고, 수소를 추가적으로 생산하여 수소 생산량이 높다<sup>14)</sup>.

메탄올 수증기 개질기에 관한 연구는 활발하게 진행되고 있다. Suh 등<sup>15)</sup>은 일정 벽면 온도 조건을 가정한 마이크로 채널 형태의 메탄올 수증기 개질기의 배열에 따른 거동에 대한 분석을 실시하였다. Jang

등<sup>16)</sup>은 STAR-CCM+<sup>®</sup> (Siemens Industry Software Inc., Plano, USA)을 이용하여 곡유로 채널을 가진 메탄올 수증기 개질기의 유량에 따른 메탄올 전환율 및 수소 생성량에 대한 연구를 진행하였다. 또한, Ribeyrinha 등<sup>17)</sup>은 BASF사(Ludwigshafen, Germany)의 RP-60을 이용하여 packed bed 형태의 membrane reactor의 고온 운전 특성에 대해 실험 및 해석 비교 연구를 진행하였으며, 수치적 방법을 통해 고온에서 RP-60 (BASF사)의 반응 속도(reaction rate)를 계산하였다. 이와 같이 메탄올 수증기 개질기 내부에서의 화학반응에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있으나, 반응 후 생성물의 거동에 관한 연구는 아직 미비하다.

본 연구에서 사용하는 메탄올 수증기 개질기는 내부에서는 메탄올 수증기 개질 반응이 일어나며, 외부에서는 과열증기를 이용하여 열을 공급하는 형태의 여러 개의 증공관형 다발이 압력용기(pressure vessel)에 모여 단일 출구로 나가는 형상이다. 열 공급은 대향류형 증공관에서 일어나며, 압력용기에 유입되는 가스는 메탄올 수증기 개질 반응의 생성물이다. 이러한 형상은 확장관(expansion pipe)과 수축관(contraction pipe)의 형태를 모두 가지고 있으며, 정체영역(stagnation zone) 및 부압(negative pressure)이 발생한다. 이런 현상들은 압력용기 내부에서 생성물 가스 배출이 원활하게 되지 않거나, 출구에서 재순환에 의한 응축 및 부식 등의 문제를 야기한다.

본 연구는 3차원 전산 해석을 통해 각각의 튜브형 메탄올 수증기 개질기가 압력용기에 모일 때, 서로의 유동에 미치는 영향을 파악하며, 이에 따라 발생하는 문제점을 개선하기 위해 압력용기의 높이, 단일 출구의 지름, 출구에서 필렛 유무를 변수로 설정하였다. 그 결과를 바탕으로 압력용기 내부의 유선(streamline)과 정압(static pressure)을 비교하여 최적의 형상을 선정하기 위한 목적을 가지고 있다.

## 2. 전산 해석

형상 제작과 격자 형성 및 해석 진행을 위해 상용 프로그램인 ANSYS Fluent<sup>®</sup> (ANSYS Inc., Canonsburg,

USA)를 사용하였으며, 정상상태, 비압축성 난류 유동을 가정하였다.

본 연구에서 사용되는 메탄올 수증기 개질기 형상은 내부 직경이 4.55 mm인 19개의 입구를 가지며, 압력용기를 통해 단일출구로 나가는 형상을 가지고 있다. 또한, 원통형 벽면을 가지고 있으며, 천장은 타원형 형태이며 단열되어 있다. 개질 반응의 생성물들은 1.94 m/s, 553.14 K로 압력용기에 유입된다. 압력용기의 작동압력은 2,980 kPa이며, 유체의 레이놀즈 수는 3,860으로 난류 형상을 가진다. Fig. 1에 압력용기의 형상과 격자 형성 모습을 나타냈으며, 형상에 대한 정보 및 경계조건을 Table 1에 나타냈다.

기준 케이스(Case 1)인 필렛이 없으며 단일 출구의 직경이 22 mm, 압력용기의 높이가 50 mm인 형상을 바탕으로 격자를 형성하였다. 격자 수렴 테스트

를 위해 격자 크기에 따른 출구의 면적 가중 평균 속도(area weighted average velocity)를 비교하였다. 격자의 크기를 2 mm, 3 mm, 5 mm, 10 mm로 설정하여 해석을 진행한 결과, 각 1.56 m/s, 1.57 m/s, 1.60 m/s, 1.75 m/s로 격자의 크기를 2 mm와 3 mm로 설정하였을 때 차이는 약 0.64%로 미미하였다. 하지만 격자의 수는 격자의 크기를 3 mm로 설정하였을 때 2,318,462개, 2 mm인 경우 5,464,245개였으며, 이는 약 2.36배 증가한 값이다. 결과적으로, 해석 속도 향상을 위해 격자의 크기를 3 mm로 설정하였다.

Table 2에는 압력용기의 여러 가지 케이스에 대해 나타냈다. 기준 케이스를 바탕으로 KS 강관 규격에 따라 단일 출구의 지름을 증가시켰으며, 각 지름에 따른 압력용기의 높이를 변화시켜 그 영향을 관찰하였다. 또한 가장 원활한 유동 현상을 보인 케이스를 선정하여 필렛을 추가하였으며, 그 크기에 따른 비교

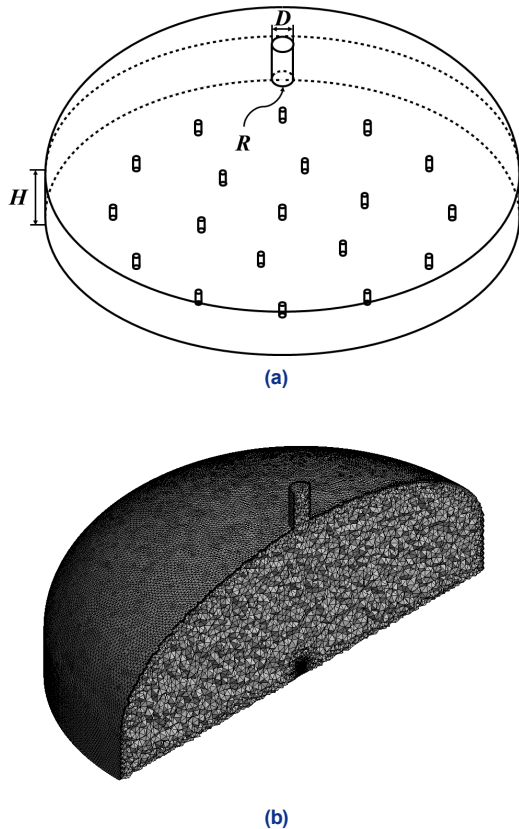


Fig. 1. (a) Schematic diagram and (b) mesh profile

Table 1. Geometry parameter and boundary conditions

Parameter	Unit	Value
Diameter	mm	450
Inlet diameter	mm	4.55
Inlet velocity	m/s	1.94
Temperature	K	553.14
Pressure	kPa	2,980
Reynolds number	-	3,860

Table 2. Different cases of pressure vessel

Parameter	Diameter (D)	Height (H)	Radius (R)
Unit	mm		
Case 1	22	50	0
Case 2	22	100	0
Case 3	27.5	50	0
Case 4	27.5	100	0
Case 5	36.2	50	0
Case 6	36.2	100	0
Case 7	36.2	100	5
Case 8	36.2	100	10

해석을 진행하였다.

유동 해석을 진행하기 위해, 대표적인 난류 모델이며 내부 유동에 대한 원활한 해석을 진행할 수 있는 standard k-epsilon 모델을 사용하였다. 또한 hybrid initialization을 통해 속도, 압력 및 온도의 체적 평균값의 변화와 residual이  $10^{-6}$  이하로 떨어지는 경우를 수렴 판정 기준으로 설정하였다. 지배방정식은 다음과 같다.

연속 방정식  

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식  

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \tag{2}$$

에너지 보존 방정식  

$$\nabla \cdot [\vec{v}(\rho \epsilon + p)] \tag{3}$$

$$= \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum h_j \vec{J}_j) + S_h$$

난류 운동에너지 방정식  

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \tag{4}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

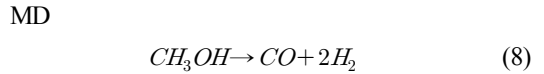
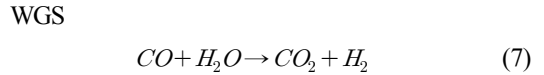
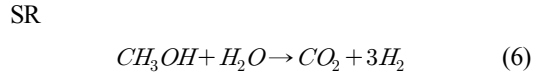
난류 소산률 방정식  

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \tag{5}$$

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

본 연구에서 사용하는 압력용기의 작동 유체의 물성을 설정하기 위해, Aspen HYSYS® (Aspen Technology Inc., Bedford, USA)를 이용하여 steam reforming (SR), water gas shift (WGS), methanol decomposition (MD)에 대한 메탄올 수증기 개질의 평형 반응 해석을 진

행하였다. 화학 반응 결과를 이용하여 생성물의 평균 밀도, 비열, 열 전도도 및 점성을 계산하였다. 메탄올 수증기 개질 반응의 화학반응 식<sup>18)</sup>과 혼합물의 상태량을 다음 식과 Table 3에 나타냈다.



### 3. 해석 결과

#### 3.1 단일 출구의 직경과 높이에 따른 변화

필렛이 없는 경우, 출구의 직경과 높이에 대한 변화에 따른 해석을 진행하였다. Fig. 2를 보면, 출구의 직경이 가장 작은 경우, 입구 유량은 동일한데 반해 출구 면적이 감소하여 출구에서의 면적 가중 평균 속도가 1.566 m/s로 가장 높았다. 이는 연속방정식을 이용한 계산값인 1.575 m/s와의 오차가 약 0.57%로, 계산 결과가 신뢰성 있다고 판단하였다. 해석 결과, 출구의 직경이 증가할수록 속도는 감소하였지만 유선에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

높이가 50 mm인 Cases 1, 3, 5의 경우(Fig. 2)를 보면, 서로 다른 입구에서 나온 혼합물의 거동이 상단의 타원형 천장에 부딪힌 후 불규칙하게 이동하는 모습을 볼 수 있다. 이와 달리, 높이가 100 mm인 Cases 2, 4, 6 (Fig. 3)은 서로 다른 입구에서 나온 혼합물들이 다른 혼합물들의 거동에 크게 영향을 주지

Table 3. Mixture properties

	$\rho$	$C_p$	$k$	$\mu$
Unit	kg/m <sup>3</sup>	J/kg·K	W/m·K	Pa·s
Value	8.36	2597.6	0.120949	2.31E-05

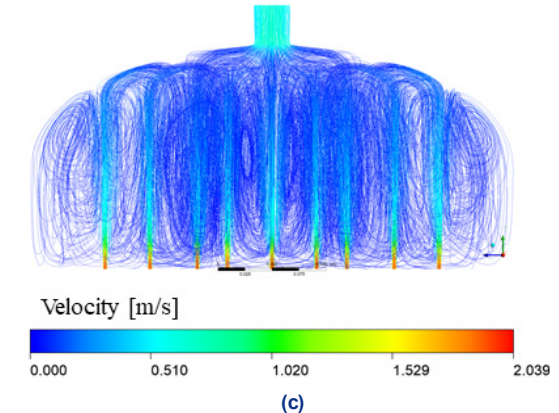
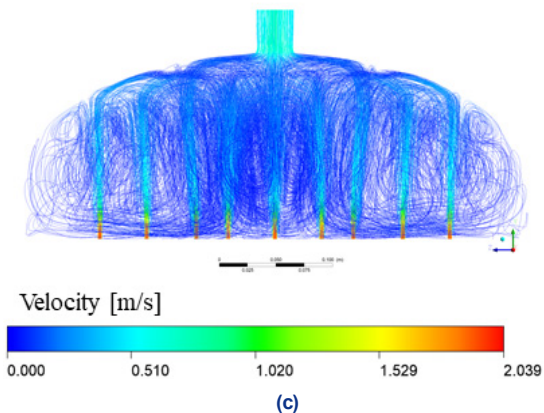
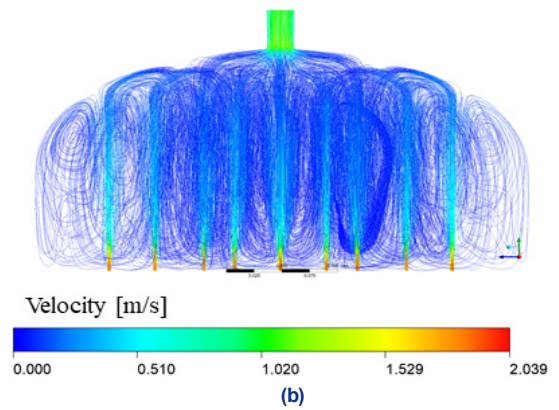
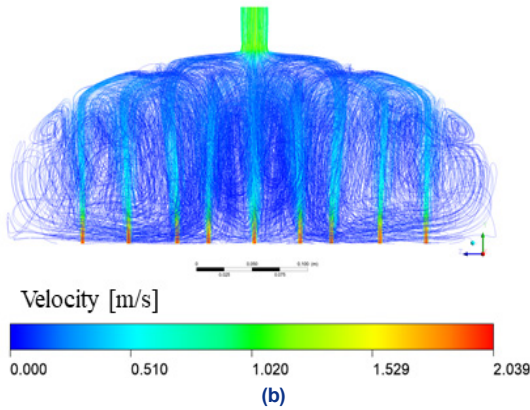
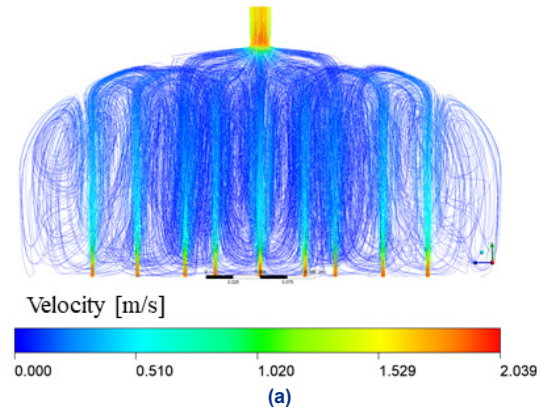
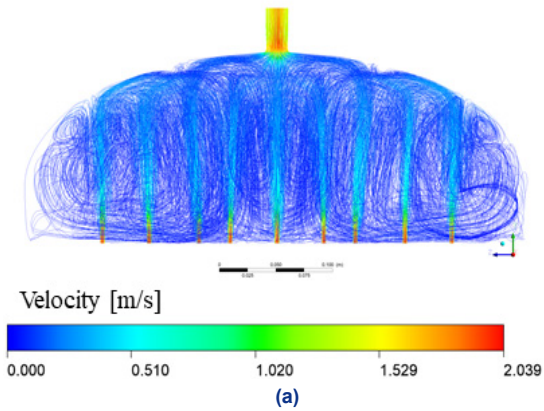


Fig. 2. Streamline of pressure vessel (a) Case 1 (b) Case 3 (c) Case 5

Fig. 3. Streamline of pressure vessel (a) Case 2 (b) Case 4 (c) Case 6

않은 채 압력용기 내부에서 재순환하는 모습을 볼 수 있다. 이는 1.94 m/s의 속도로 유입되는 혼합물의 운동에너지가 높이가 증가할수록 중력의 영향을 받

아 감소하여 천장에 부딪힌 후 다른 유체의 흐름에 영향을 주지 않고 재순환하는 현상을 명확히 나타내기 때문이다.

정확도 높은 해석을 위해 메탄올 수증기 개질기 압력용기의 작동압력을 2,980 kPa로 설정한 후, 출구에서의 계기압력을 0 Pa로 설정하여 해석을 진행하였다. 그 결과는 Fig. 4와 같다.

직경이 동일한 경우, 높이에 따른 압력 차이 (pressure difference)는 높이가 증가할수록 증가하였으나, 그 범위는 1 Pa 이내로 무시할 만한 수준이다. 하지만 직경이 증가할수록, 압력 차이는 높이가 50 mm인 경우에는 이전 값의 55.33%, 65.29%로 감소하였으며, 높이가 100 mm인 경우에는 각 56.89%, 58.04%로 감소하였다. KS 강관 규격에 따라 단일 출구의 직경을 증가시킬 경우, 압력 차이의 감소량이 증가하였으며, 그 값이 0 Pa에 가까워지는 것을 확인할 수 있다.

압력 차이는 작동 압력인 2,980 kPa에 비해 굉장히 작은 수치이지만, 이는 수축관에서 부압이 발생하여 추가적인 재순환 영역을 발생시키므로 설계 시 중요한 요소 중 하나이다.

압력용기에서의 부압은 Fig. 5에서 나타난 것과 같이 압력용기의 출구의 도입부에서 나타난다. 이 압력용기는 19개의 입구에서 유입되는 가스들이 합쳐져 큰 공간으로 나오는 확장관 형태와 압력용기에서 단일 출구관으로 나가는 축소관 형태로 구성되어 있다. 이때, 압력 차이가 입구보다는 출구에서 차이가 크게 나타나며, 이때 발생하는 부압에 의해 정제영역이 형성되어 재순환, 부식 등의 문제가 발생한다.

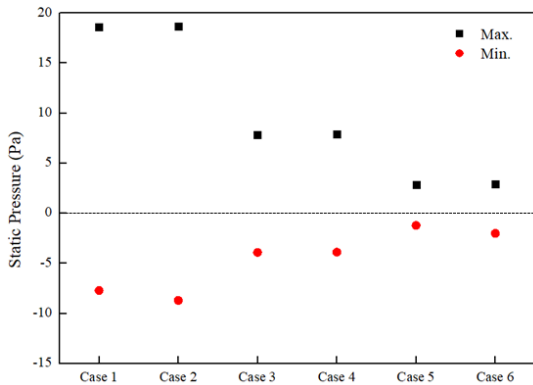


Fig. 4. Max. and min. static pressure in different cases

### 3.2 필렛 적용에 따른 변화

위에서 언급한 문제를 해결하기 위한 방법은 출구의 도입부에 필렛 형상을 적용하는 것이다. 필렛의 유무에 대한 효과를 비교하기 위해 최적화된 형상을 선정하였다. 압력 차이가 가장 작게 나타나는 직경과 유체의 간섭이 가장 적게 나타나는 높이인 Case 6 (D=36.2 mm, H=100 mm)을 기준으로 필렛 크기를 변화시켜 비교하였다.

Case 6을 기준으로 필렛의 크기를 5 mm, 10 mm로 증가시켰을 때, 압력 차이는 이전 값의 약 38.90%, 13.67%로 감소한다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 최대 압력의 값의 감소량에 비해 최소 압력의 증가량이

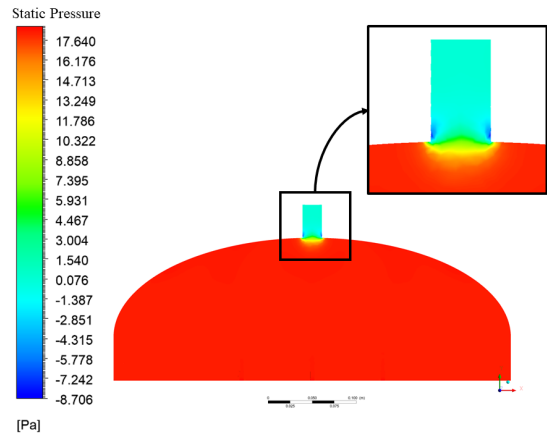


Fig. 5. Negative pressure in outlet of referent case

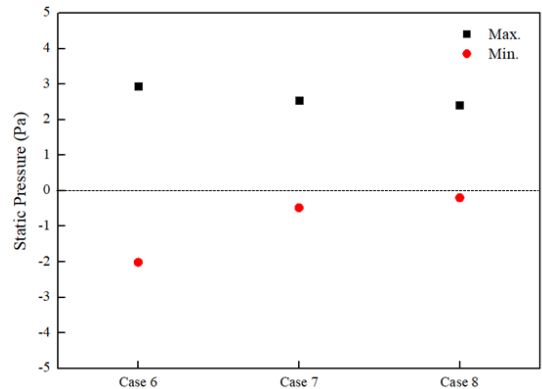


Fig. 6. Max. and min. static pressure in different filleted cases

더 크므로 압력 차이의 값이 감소한다. 하지만 Case 6의 압력 차이는 4.95 Pa, Case 7의 압력 차이는 3.023 Pa, Case 8의 압력 차이는 2.609 Pa로, 필렛의 크기가 증가할수록 압력 차이의 감소량이 작아진다.

결과적으로 필렛을 추가시키는 것은 부압의 크기를 감소시키나, 필렛 크기의 증가에 따른 부압 크기의 감소량에 한계가 존재한다.

#### 4. 결론

지금까지 주어진 형상의 단일 출구의 직경과 압력 용기의 높이 그리고 출구에서 필렛 형상에 따른 메탄을 수증기 개질기 내부 유동 변화에 대한 해석 및 비교를 진행하였다. 본 연구를 통해 내린 결론은 다음과 같다.

1) 압력용기 내부의 유체 거동은 단일 출구의 직경보다는 압력용기의 높이와 관계가 깊으며, 높이가 증가하면 중력에 의해 유체의 운동에너지가 감소하여 서로 다른 유체의 간섭이 감소한다.

2) 압력용기의 단일 출구 직경이 커질수록 출구의 도입부에서 발생하는 부압의 크기는 압력용기 높이가 50 mm인 경우 각 50.57%, 15.84%로 감소하며, 높이가 100 mm인 경우 각 44.66%, 23.12%로 감소한다. 출구 직경이 증가함에 따라 부압의 크기는 감소하지만, 부압의 감소량은 줄어들게 된다.

3) 출구 도입부에 5 mm 크기의 필렛 형상을 추가하는 경우, 부압의 크기는 약 23.725%로 감소한다. 그 크기를 10 mm로 증가시킬 경우, 필렛이 없는 형상보다 부압의 크기는 약 9.77%로 감소하지만, 감소량은 점점 작아진다.

4) 작동 유체의 온도인 553.14 K에서 수증기의 포화 압력은 약 6415.49 kPa이며, 압력용기 내부에서 증가하는 압력은 포화압력에 도달하지 못한다. 따라서, 압력 변화에 의한 압력용기 내부 수증기 응축 현상은 발생하지 않는다.

결과적으로, 출구가 입구로부터 멀리 떨어져 있으며, 단일 출구 직경이 가장 크고 필렛 형상이 추가되어 있는 Case 7과 Case 8이 유체의 간섭을 줄이고 부

압 형성을 억제하는 효과를 가질 것이다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소(UD180051GD)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

1. N. Z. Muradov and T. N. Veziroğlu, ““Green” path from fossil-based to hydrogen economy: an overview of carbon-neutral technologies”, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 33, No. 23, 2008, pp. 6804-6839, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.054>.
2. M. Steinberg, “Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming”, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 24, No. 8, 1999, pp. 771-777, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00128-1).
3. A. L. Dicks, “Hydrogen generation from natural gas for the fuel cell systems of tomorrow”, *J. Power Sources*, Vol. 61, No. 1-2, 1996, pp. 113-124, doi: [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(96\)02347-6](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(96)02347-6).
4. C. Song, “Fuel processing for low-temperature and high-temperature fuel cells: challenges, and opportunities for sustainable development in the 21st century”, *Catal. Today*, Vol. 77, No. 1-2, 2002, pp. 17-49, doi: [https://doi.org/10.1016/s0920-5861\(02\)00231-6](https://doi.org/10.1016/s0920-5861(02)00231-6).
5. L. Carrette, K. A. Friedrich, and U. Stimming, “Fuel cells: principles, types, fuels, and applications”, *ChemPhysChem*, Vol. 1, No. 4, 2000, pp. 162-193, doi: [https://doi.org/10.1002/1439-7641\(20001215\)1:4%3C162::aid-cphc162%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/1439-7641(20001215)1:4%3C162::aid-cphc162%3E3.0.co;2-z).
6. X. Cheng, Z. Shi, N. Glass, L. Zhang, J. Zhang, D. Song, and J. Shen, “A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: impacts, mechanisms, and mitigation”, *J. Power Sources*, Vol. 165, No. 2, 2007, pp. 739-756, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.012>.
7. S. Kélouwani, K. Agbossou, and R. Chahine, “Model for energy conversion in renewable energy system with hydrogen storage”, *J. Power Sources*, Vol. 140, No. 2, 2005, pp. 392-399, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.08.019>.
8. A. Züttel, “Hydrogen storage methods”, *Naturwissenschaften*, Vol. 91, No. 4, 2004, pp. 157-172, doi: <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>.
9. F. A. de Bruijn, “Hydrogen as a future energy carrier. Edited by Andreas Züttel, Andreas Borgschulte, and Louis Schlapbach.”, *ChemSusChem*, Vol. 1, No. 8-9, 2008, pp. 782-783, doi: <https://doi.org/10.1002/cssc.200800119>.

10. K. Faungnawakij, R. Kikuchi, and K. Eguchi, "Thermodynamic evaluation of methanol steam reforming for hydrogen production", *J. Power Sources*, Vol. 161, No. 1, 2006, pp. 87-94, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.091>.
11. G. Schuller, F. V. Vázquez, W. Waiblinger, S. Auvinen, and P. Ribeirinha, "Heat and fuel coupled operation of a high temperature polymer electrolyte fuel cell with a heat exchanger methanol steam reformer", *J. Power Sources*, Vol. 347, 2017, pp. 47-56, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.02.021>.
12. H. Ji, J. Lee, E. Choi, and S. Yang, "Methanol steam reforming using multilayer cup structure for catalyst support", *Trans. Korean Hydrog. New Energy Soc.*, Vol. 31, No. 2, 2020, pp. 202-209, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.2.202>.
13. U. Cheon, K. Ahn, and H. Shin, "Study on the characteristics of methanol steam reformer using latent heat of steam", *Trans. Korean Hydrog. New Energy Soc.*, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 19-24, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.19>.
14. R. O. Idem and N. N. Bakhshi, "Production of hydrogen from methanol. 2. experimental studies", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 33, No. 9, 1994, pp. 2056-2065, doi: <https://doi.org/10.1021/ie00033a006>.
15. J. S. Suh, M. T. Lee, R. Greif, and C. P. Grigoropoulos, "A study of steam methanol reforming in a microreactor", *J. Power Sources*, Vol. 173, No. 1, 2007, pp. 458-466, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.038>.
16. H. Jang, I. S. Park, and J. S. Suh, "Study on methanol conversion efficiency and mass transfer of steam-methanol reforming on flow rate variation in curved channel", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 3, 2015, pp. 261-269, doi: <https://doi.org/10.3795/ksme-b.2015.39.3.261>.
17. P. Ribeirinha, M. Abdollahzadeh, M. Boaventura, and A. Mendes, "H<sub>2</sub> production with low carbon content via MSR in packed bed membrane reactors for high-temperature polymeric electrolyte membrane fuel cell", *Appl. Energy*, Vol. 88, 2017, pp. 409-419, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.015>.
18. W. Wiese, B. Emons, and R. Peters, "Methanol steam reforming in a fuel cell drive system", *J. Power Sources*, Vol. 84, No. 2, 1999, pp. 187-193, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00316-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00316-X).