

수소액화용 극저온 열교환기 내 촉매 수소 전환반응에 관한 연구

손상호[†] · 윤석호

한국기계연구원 에너지기계연구본부 열시스템연구실

A Study on the Catalytic Ortho-Para Hydrogen Conversion in the Cryogenic Heat Exchanger Filled with Catalysts for Hydrogen Liquefaction

SANGHO SOHN[†], SEOK HO YOON

Department of Thermal Systems, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

[†]Corresponding author :
sangho@kimm.re.kr
sangho35.sohn@gmail.com

Received 14 June, 2021
Revised 22 June, 2021
Accepted 23 June, 2021

Abstract >> This paper conducted a study on the ortho-para hydrogen conversion in the cryogenic heat exchanger filled with catalysts for hydrogen liquefaction by utilizing the numerical model of plate-fin heat exchanger considering catalytic reaction of ortho-para hydrogen conversion, heat and mass transfer phenomena and fluid dynamics in a porous medium. Various numerical analyzes were performed to investigate the characteristics of ortho-para hydrogen conversion, the effects of space velocity and activated catalyst performance.

Key words : Plate-fin heat exchanger(플레이트-핀 열교환기), Ortho-para hydrogen conversion(오쏘-파라 수소전환), Hydrogen liquefaction(수소액화), Catalytic reaction(촉매반응), Space velocity(공간속도)

1. 서론

전 세계적으로 지구 환경보호에 대한 관심이 높아지면서 지구 온난화, 미세먼지 등 각종 기후 변화에 대응하기 위해 관련 기술 개발에 관한 다양한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 특히 온실가스 방출로 인하여 가속화되고 있는 지구 온난화 현상을 해결하기 위해 수소를 유망한 에너지원으로 주목하고 다가오는 수소사회를 대비하는 노력을 분주히 하고 있다. 그중에서도 수소의 이송과 저장은 미래 수소사회로

진입하는 데 가장 중요한 기술로 요구되고 있다¹⁾. 수소는 상온에서 고압으로 압축되거나 극저온으로 액화되어 저장탱크에 저장될 수 있다. 액화된 수소는 200 bar에서 압축되는 것보다 약 4.5배 이상의 밀도를 가지게 되어 저장용량과 무게를 효율적으로 낮출 수 있기 때문에²⁾, 대용량 저장을 위해서는 수소를 액체로 저장하는 것이 바람직하며 이를 위한 국내 연구들이 최근 들어 조금씩 이루어지고 있다.

수소는 원자핵의 회전 방향에 따라 오쏘 수소와 파라 수소로 구분되어 존재하며, 그 조성비는 상온의

평형상태에서는 3:1이지만 온도가 20 K까지 떨어지면 거의 파라-수소 형태로만 남게 된다³⁾. 즉, 수소는 냉각온도가 낮아짐에 따라 오쏘 수소가 점차 파라 수소로 전환되어 평형상태에 이르게 되며, 이 수소 전환반응은 매우 느린 속도로 진행되며 상당한 발열 과정을 수반한다. 이와 같은 반응특징의 문제를 해결하기 위하여 작은 구형태의 촉매가 충전된 플레이트 핀 열교환기(plate-fin heat exchanger, PFHE)의 개발 필요성이 점차 주목받고 있다^{1,2,4)}. Wilhelmsen 등¹⁾과 Donaubauer 등⁴⁾은 PFHE를 1차원으로 가정하고 간단한 수식을 이용하는 공정해석연구를 하였지만 채널 내 상세한 유동 및 열전달 현상을 분석하는 데 한계가 있었다. Liang과 Yonglin⁵⁾은 최근 수소액화공정에 관한 설계 및 최적화 연구들을 정리하였다. Park 등⁶⁾은 촉매가 충전된 PFHE의 차압특성을 실험과 비교하고 전산유체해석(computational fluid dynamics, CFD)을 수행하였지만 오쏘-파라 수소전환 반응식은 고려하지 않았다. 이 PFHE 내 채널은 충전된 촉매 사이로 유로가 형성되는 다공성 구조 형태이기 때문에 펠렛의 크기에 따라서 공극률과 비틀림 등의 다공성 특성과 함께 열전달 및 물질전달 현상이 달라져 수소전환 반응특성에 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서 촉매가 충전된 PFHE를 보다 정밀하게 설계하기 위해서는 촉매가 충전된 채널의 다공성 특성을 반영하여 수소전환 반응을 분석할 수 있는 3차원 해석모델의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 수소액화 열교환기로 주목받고 있

는 촉매충진형 플레이트 핀 열교환기의 수소액화특성을 상세히 분석하기 위하여 열교환기 채널을 3차원의 다공성 매질로 모델링하고 촉매 표면에서 발생하는 수소전환반응과 열전달 및 물질전달 현상을 시뮬레이션 할 수 있는 해석모델을 개발하였고 이를 통하여 오쏘-파라 수소전환 특성, 공간속도 효과와 촉매성능개선 효과 등을 분석하였다.

2. 모델 및 이론

2.1 촉매충진형 플레이트-핀 열교환기

현재 극저온 수소액화 플랜트에서는 오쏘-파라 수소전환을 위한 극저온 열교환기로 전열면적이 넓고 압력강하에 유리한 플레이트-핀 열교환기 타입을 적용하고 있으며, 플레이트 사이에 위치하는 핀의 형상은 일반적으로 Fig. 1과 같은 구조를 가지며 주요 형상변수들은 Table 1과 같다.

오쏘-파라 수소전환반응을 촉진하기 위하여 사용한 촉매는 현재 플랜트에서 상용화되어 널리 사용되고 있는 산화철 촉매(ferric oxide catalyst)인 IONEX 촉매이고, 1960년대부터 산화철 촉매에 의한 수소전환반응에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 정확도가 높은 반응식도 개발되어 왔다. 이 촉매의 메쉬 사이즈(mesh size)는 30이고 이는 구 형태에서 유효직경이 0.6 mm에 해당된다.

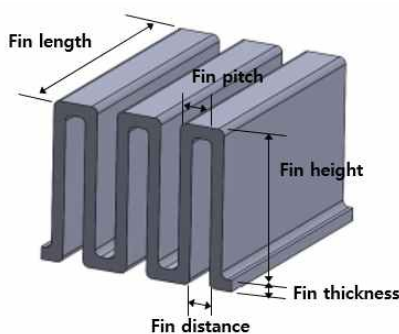


Fig. 1. Configuration of the plate-fin heat exchanger for hydrogen liquefaction

Table 1. The geometrical parameters and values related to the shape of fins in the plate-fin heat exchanger

Geometrical parameters	Values (mm)
Fin thickness	0.5
Fin height	5.9
Fin pitch	1.34
Fin length	914.4
Fin distance	0.84
Parting sheet distance	6.4

2.2 모델링 및 지배방정식

오쏘-파라 수소전환은 플레이트-핀 열교환기의 채널에서 구형의 촉매들 사이로 오쏘-파라 수소가 흘러가며 촉매 표면에서 온도변화에 따라 수소전환반응이 평형전환율에 도달하기까지 지속적으로 발생하고, 이에 따라 파라 수소의 농도 비율이 점차 높아지게 된다. 이와 같이 수소전환반응을 전산 모사하기 위하여 촉매가 충전된 채널을 다공성 매질로 가정하고 촉매 표면에서 수소전환반응식을 적용하여 채널 내 오쏘-파라 수소의 열전달 및 물질전달 현상을 구현하는 전산해석모델을 개발하였으며 상용 프로그램인 ANSYS (Canonsburg, PA, USA)의 Fluent를 사용하였다⁷⁾.

촉매가 충전된 플레이트-핀 열교환기의 전산 열유동 해석을 위하여 주기적으로 연결되어 있는 채널의 한 부분을 Fig. 2와 같이 격자모델링을 하였다. 채널의 유체영역은 다공성 매질로 설정하여 공극율과 이에 따른 투과도(permeability), 점성저항계수(viscous resistance coefficient), 관성손실계수(inertial loss coefficient) 등을 계산하여 입력하였다. 채널의 유체는 오쏘 수소와 파라 수소의 혼합물로 정의하였다. 오쏘-파라 수소의 물성치인 밀도, 점성계수, 열전도도, 확산계수, 비열 등은 NIST (Gaithersburg, MD, USA)의 REFPROP으로부터 계산된 값들로부터 얻어진 온도 함수식으로 정의되었다. 이는 Fluent에서 UDF 함수로 정의하여 전산해석과정에서 모든 물성치들을 온

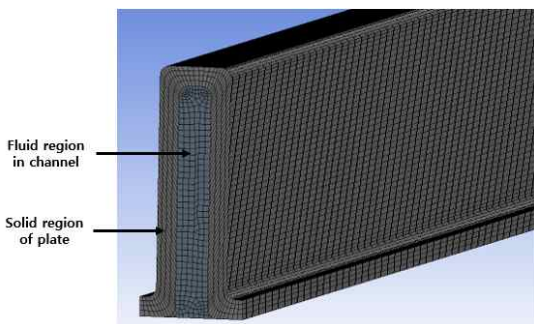


Fig. 2. Numerical model of plate-fin heat exchanger filled with catalysts

도에 따른 값으로 계산하여 적용하였다. 극저온 온도 범위에서는 물성치값들이 온도에 따라 크게 변화하기 때문에 온도함수식으로 표현하여 반영하였다. 그리고 플레이트의 고체영역의 물성값은 알루미늄으로 설정하였다.

이와 같은 플레이트-핀 열교환기의 채널 내 오쏘-파라 수소의 전환반응과 물질전달거동을 전산 열유동해석하기 위한 지배방정식은 다음 수식의 연속방정식과 운동량방정식을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) \tag{2}$$

여기서 S_m 은 오쏘-파라 수소전환반응에 의해 파라 수소가 증가 또는 감소하는 질량 소스항이고, P 는 압력이고 τ 는 전단응력을 의미한다.

에너지보전방정식은 다음 수식과 같으며 S_h 은 수소전환반응에 의해 발생하는 소스항을 의미한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \tag{3}$$

오쏘 수소와 파라 수소의 농도에 따른 확산운동을 모사하는 기체수송방정식을 만족해야 하며, 그 수식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \tag{4}$$

$$\vec{J} = -\rho D_{m,i} \nabla Y_i \tag{5}$$

여기서 J 는 확산플럭스, $D_{m,i}$ 는 혼합물에서 i 종의 확산계수, Y_i 는 질량분율을 나타낸다.

다공성 매질에서는 유효확산계수가 다음 수식과 같이 정의되어 적용되었다.

$$D_{m,i}^{eff} = \frac{\epsilon}{\tau} D_{m,i} \tag{6}$$

여기서 ε 는 공극률(positivity)이고 τ 은 뒤틀립(tortuosity)을 의미한다.

극저온에서 오쏘-파라 수소의 전환반응식은 Hutchinson 등^{8,9)}이 높은 정확도로 검증하여 제시한 다음 수식으로 표현된다.

$$r_{o \rightarrow p} = K \cdot \ln \left[\left(\frac{f_{H_2,p}}{f_{H_2,p}^{eq}} \right)^n \left(\frac{1 - f_{H_2,p}^{eq}}{1 - f_{H_2,p}} \right) \right] \quad (7)$$

여기서 K 와 n 은 온도와 압력의 함수로 표현되는 파라미터값들^{8,9)}이고, $f_{H_2,p}$ 는 파라 수소의 몰분율을 나타내고 상부첨자 eq 는 평형값을 의미한다.

파라 수소의 평형 몰분율은 상태방정식을 적용하여 얻어진 최소 깁스에너지로부터 계산될 수 있으며 다음 수식과 같다.

$$f_{H_2,p}^{eq} = 0.1 \left[\exp \left(\frac{-5.313}{\tau} \right) + 0.1 \right]^{-1} - 2.52 \times 10^{-4} \tau^3 + 3.71 \times 10^{-3} \tau^2 - 2.04 \times 10^{-3} \tau - 0.00227 \quad (8)$$

여기서 τ 는 T/T_c 이며 T_c 는 수소의 임계온도를 의미한다.

이와 같은 수소전환반응식인 식 (7)과 (8)을 상용 CFD 프로그램인 Fluent에서 소스텀으로 적용하기 위하여 사용자정의함수(user defined function, UDF) 기능인 DEFINE_VR_RATE 함수를 사용하였으며 모든 유체영역 격자에서 온도, 평형몰분율, 파라 수소의 몰분율 등의 값들로 반응률을 계산하였다. UDF에서는 질량분율값을 제공하므로 몰분율로 변환한 값으로 수식을 프로그래밍 하는 것에 주의를 기울여야 한다.

2.3 전산해석조건

촉매가 충전된 플레이트-핀 열교환기의 수소전환 반응 특성을 분석하기 위하여 Table 2와 같은 수소액화 플랜트의 운전조건¹⁰⁾에서 채널 내 열전달 및 물질전달을 전산 시뮬레이션을 수행하였다. 플레이트-핀

열교환기에 유입되는 총 수소의 질량유량은 6.4 g/s 이고 이를 총 채널수를 나누게 되면 단위 채널로 들어오는 수소의 입구 질량유량은 0.002857143 g/s이다. 그리고 열교환기 채널의 전체길이 중에서 마지막 100 mm 길이에 촉매가 충전되어 있는 것으로 설정하였고, 채널의 입구온도는 27.5 K이며 선형적으로 감소하는 것으로 가정하였다. 수소전환 특성곡선을 도출하기 위하여 다양한 범위의 공간속도(space velocity)에 따른 전산 시뮬레이션들을 수행하였다. 공간속도는 다음과 같이 정의된다.

$$v_s = \frac{Q_{H_2,p}}{V} \quad (9)$$

여기서 $Q_{H_2,p}$ 는 입구로 유입되는 체적유량이고 V 는 촉매가 충전된 반응기 부피를 말한다. 공간속도는 단위시간당 처리가능한 반응기 부피를 의미하며 촉매가 충전된 반응기의 주요한 특성을 의미한다.

3. 전산해석결과 및 고찰

3.1 오쏘-파라 수소전환 특성

수소액화공정에서 요구되는 운전조건인 Table 2에서 대표적인 오쏘-파라 수소전환 특성을 상세히 살펴

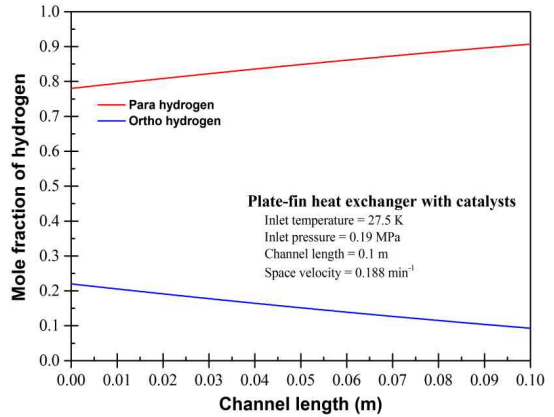
Table 2. The operating conditions for CFD simulation of the plate-fin heat exchanger with catalysts

Contents	Values
The number of layer	20
The number of channel in a layer	56
Total mass flow rate of H ₂ (g/s)	6.4
Mass flow rate of H ₂ in a single channel (g/s)	0.002857143
Inlet temperature (K)	27.5
Inlet pressure (MPa)	0.19
Length of channel with catalysts (mm)	100
Space velocity (min ⁻¹)	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 3, 4, 5, 10

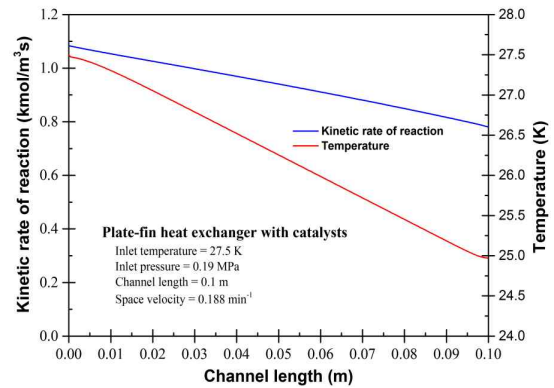
펴보았으며, 단위채널로 유입되는 수소의 질량유량은 공간속도 0.188 min^{-1} 에 해당된다. Fig. 3은 주요한 오쏘-파라 수소전환 특성을 채널 내 오쏘 및 파라 수소의 몰분율, 반응률 및 온도분포, 다양한 단면 그림 결과들로 나타낸 것이다. 우선 Fig. 3(a)는 채널 입구온도가 27.5 K에서 파라수소의 평형 몰분율은 0.78이며 채널 내 촉매반응을 통하여 오쏘 수소가 파라 수소로 전환되어 파라 수소의 몰분율이 점차적으로 높아지는 것을 보여준다. 이같은 결과는 기존 문헌 결과^{1,4)}와 유사하게 온도에 따라 파라 수소의 평형 몰분율에 가까워지는 경향을 보여준다. 이는 공간속도와도 밀접한 관계가 있어 3.2절에서 보다 자세히 분석하였다. Fig. 3(b)는 채널 내 온도가 낮아짐에 따라 파라 수소의 평형 몰분율이 높아지지만 오쏘-파라 수소전환 반응률은 점차 감소하는 경향을 보여준다. 이 반응률은 온도, 파라 수소 몰분율, 공간속도에 따라 결정된다. 따라서 열교환기의 입출구 온도가 동일한 조건에서는 반응률은 채널 내 수소의 공간속도에 크게 좌우될 수 있으며, 일반적으로 공간속도가 낮아질수록 반응기간이 충분해져 오쏘-파라 수소전환이 높아지지만 생산유량이 감소하는 특징이 있어 공간속도는 열교환기의 주요한 설계인자가 된다. Fig. 3(c)는 채널 내 다양한 결과인 온도, 압력, 파라 수소 몰분율, 오쏘 수소 몰분율 분포를 단면 그림으로 나타낸 것이다. 촉매로 충전된 다공성 매질의 특성으로 반경 방향으로는 거의 동일하고 길이 방향으로 감소 또는 증가하는 경향을 보여준다.

3.2 공간속도 효과

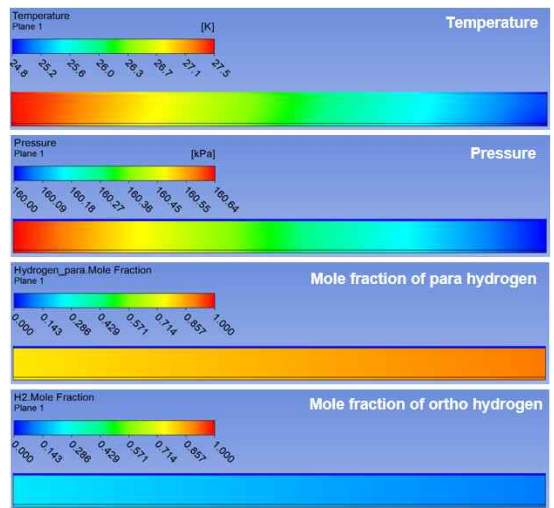
수소액화 열교환기에서 공간속도는 오쏘-파라 수소 전환과 생산유량을 결정하는 주요 설계인자이다. 본 절에서는 Table 2의 운전조건에서 공간속도 변화에 따른 오쏘-파라 수소전환 특성을 분석하기 위하여 전산 CFD 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과로 Figs. 4, 5에서 공간속도에 대한 수소 몰분율 및 압력, 공간속도에 따른 채널 내 수소 몰분율 분포 등을 그 래프와 단면 그림으로 정리하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Ortho-para hydrogen conversion characteristics along channel length in the plate-fin heat exchanger : (a) Mole fraction of hydrogen, (b) Kinetic reaction and temperature, and (c) Contour results on the cross section

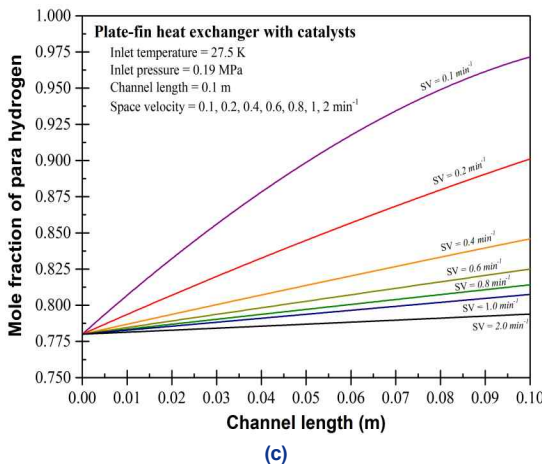
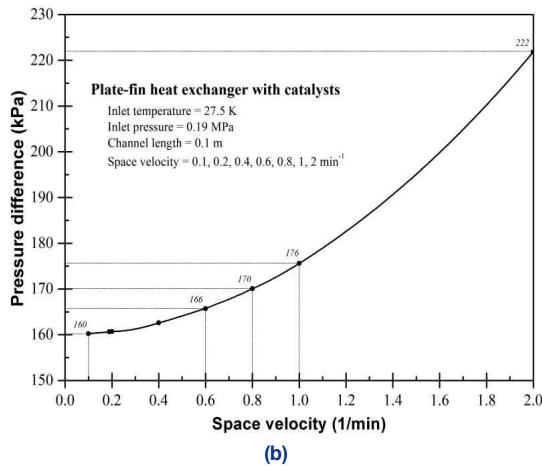
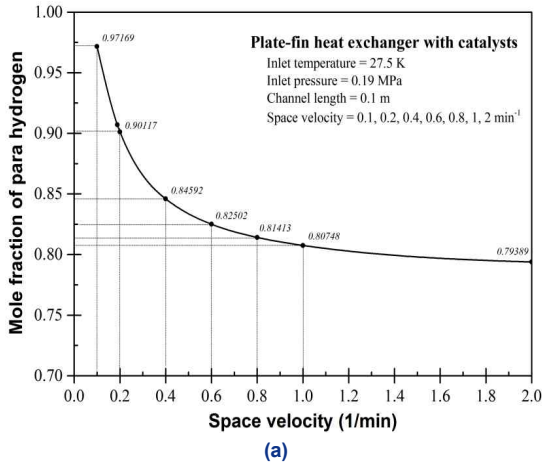


Fig. 4. The effect of space velocity on ortho-para hydrogen conversion in the plate-fin heat exchanger: (a) Mole fraction of para hydrogen, (b) pressure difference, and (c) Mole fraction of para hydrogen along channel length

Fig. 4(a)는 다양한 공간속도에서 수소액화 열교환기 출구에서 파라 수소 몰분율을 나타낸 그래프이다. 파라 수소 몰분율은 공간속도가 0.1 min⁻¹에서는 출구온도인 24.8 K에서 평형 몰분율에 가까워지지만 공간속도가 높아질수록 지수적으로 감소(exponential decay)하여 약 0.78로 수렴하는 결과를 보여준다. 이는 너무 높은 공간속도에서는 촉매 반응시간이 충분하지 않아 수소전환이 거의 이루어지지 않게 됨을 의미하며, 원하는 파라 수소 몰분율을 만족하기 위해서는 공간속도를 적절한 수준으로 낮추어 설계해야 한다. Fig. 4(b)는 다양한 공간속도에 대한 수소액화 열교환기의 압력 차이를 나타낸 그래프이며, 공간속도가 0.1 min⁻¹에서 압력 차이는 160 kPa이고 공간속도가 2.0 min⁻¹에서는 압력 차이가 222 kPa으로 상승하였다. 다공성 매질 내 점성저항 및 관성저항에 의하여 압력 차이가 속도제곱에 비례하는 경향을 보여준다. 이와 같은 공간속도에 대한 차압 곡선도 수소액화 열교환기의 주요한 설계인자 중 하나가 된다. Fig. 4(c)는 각 공간속도별 채널 내 파라 수소 몰분율

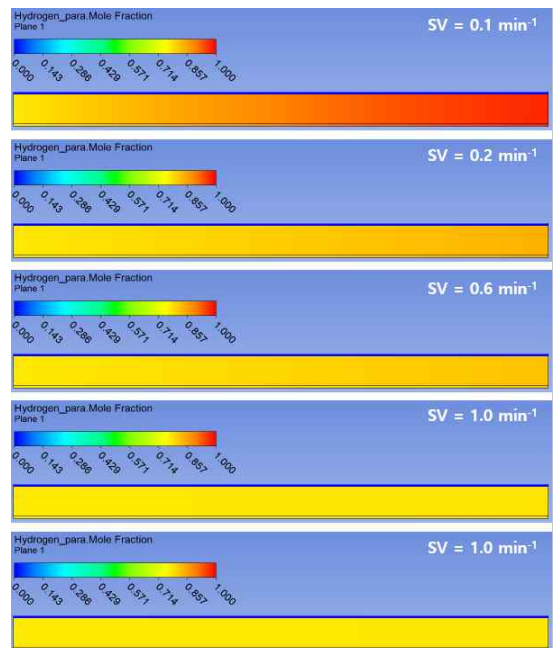


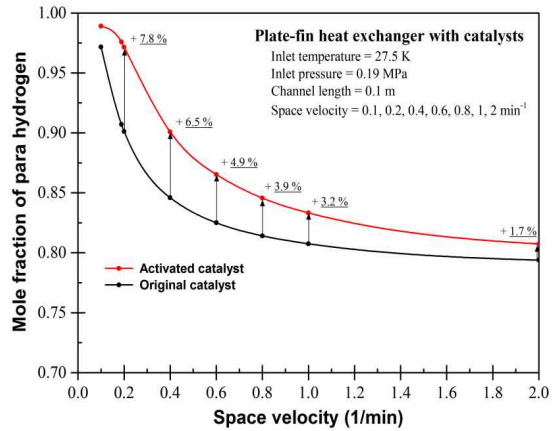
Fig. 5. The cross section results of mole fraction of para hydrogen at each space velocity

분포를 그래프를 비교하여 도시한 것이다. 공간속도가 0.2 min^{-1} 이상에서는 채널길이에 따라 거의 선형적으로 증가하지만, 공간속도가 0.1 min^{-1} 이하에서는 채널길이에 따라 로그함수 형태로 증가한다. 이는 낮은 공간속도에서는 결국 파라 수소의 평형 물분율에 도달하기 때문이며, 채널 내 물분율 분포가 선형적으로 증가하다가 곡선 형태로 평형 물분율로 수렴한 것이다. 이런 채널 내 파라 수소 물분율의 분포형태는 오쏘-파라 수소가 얼마나 효과적으로 전환되는지를 의미하며, 이와 같은 채널 내 파라 수소 물분율 분포 분석을 통하여 수소액화 열교환기의 적절한 공간속도와 채널길이를 설계할 수 있다. 마지막으로 Fig. 5는 공간속도별로 채널 내 파라 수소 물분율 분포의 단면그림을 정리하여 나타낸 것이다. 공간속도가 0.2 min^{-1} 이하에서 파라 수소 물분율이 가시적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

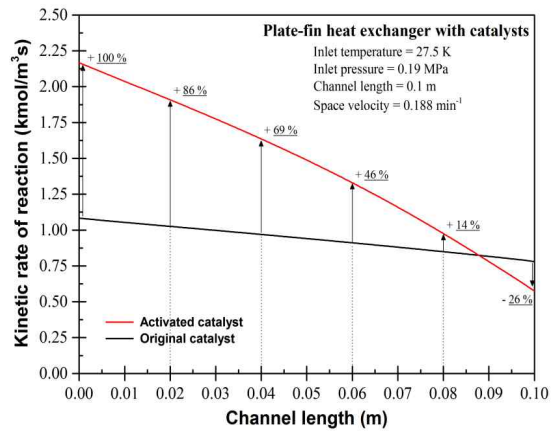
3.3 촉매 성능개선 효과

수소액화 열교환기의 기본적인 오쏘-파라 수소 전환특성은 채널 내에 충전되는 촉매의 성능에 의해 결정되며, 촉매에 대한 지속적인 연구가 진행되고 있기 때문에 촉매 성능이 개선될 가능성이 높다. 본 절에서는 촉매 성능개선이 수소 전환 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 CFD 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 Fig. 6의 그래프로 정리하였다.

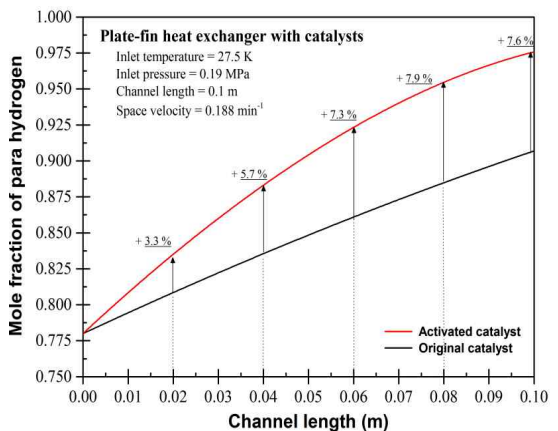
Fig. 6(a)는 공간속도에 따른 파라 수소 물분율 성능그래프이며 기존 촉매(original catalyst)와 개선된 촉매(activated catalyst)에서의 결과를 비교하여 도시하였다. 개선된 촉매는 기존 촉매에 비하여 2배 활성화된 것으로 가정하였으며, 파라 수소 물분율 그래프에서 크기는 7.8%에서 작게는 1.7% 정도 향상되는 결과를 보여준다. 아주 낮은 공간속도인 0.1 min^{-1} 이하와 높은 공간속도인 2.0 min^{-1} 이상에서는 크게 영향을 미치지 못하였으며, 이는 평형 물분율에 이미 도달하거나 반응이 미미한 경우에는 촉매 개선효과를 확인할 수는 없다. 하지만 공간속도가 유효한 범위인 $0.2\text{-}1.0 \text{ min}^{-1}$ 에서는 촉매 성능개선에 따라 공간



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. The effect of activated catalyst on ortho-para hydrogen conversion in the plate-fin heat exchanger : (a) Mole fraction of hydrogen according to space velocities, (b) Kinetic reaction rate along channel length, (c) Mole fraction of para hydrogen along channel length

속도를 높일 수 있고 이와 함께 생산유량도 증가시킬 수 있는 상당한 효과를 기대할 수 있다. Fig. 6(b)는 공간속도가 0.188 min⁻¹에서 채널길이 방향에 대한 오쏘-파라 수소전환 반응률 그래프이며 기존 촉매(original catalyst)와 개선된 촉매(activated catalyst)에서의 결과를 비교하여 도시하였다. 채널 입구부에서 개선된 촉매에서 수소전환 반응률이 100% 향상되어 반응속도가 2배로 개선됨을 알 수 있고 빠르게 파라 수소로 전환되기 때문에 채널 출구부로 갈수록 반응률도 크게 감소하는 경향을 보여준다. Fig. 6(c)는 공간속도가 0.188 min⁻¹에서 채널 내 파라 수소 물분율 분포 그래프이며 기존 촉매(original catalyst)와 개선된 촉매(activated catalyst)에서의 결과를 비교하여 도시하였다. 촉매 성능이 개선됨에 따라 파라 수소 물분율 분포가 채널 내 길이 방향에 따라 상당히 증가하는 결과를 보여주며, 이는 마치 공간속도가 낮아지는 효과와 유사하다.

4. 결론

본 연구에서는 수소액화를 위한 촉매충진형 플레이트 핀 열교환기 내 촉매에 의한 수소전환반응과 열전달 및 물질전달 현상을 전산 모사할 수 있는 3차원의 전산해석 모델을 개발하고 이를 통하여 오쏘-파라 수소전환 특성, 공간속도 효과, 촉매성능개선 효과를 분석하였다.

1) 공간속도 0.188 min⁻¹에서 대표적인 오쏘-파라 수소전환 특성을 채널 내 오쏘 및 파라 수소의 물분율, 반응률 및 온도분포, 다양한 단면 그림 결과들로 정리하여 분석하였다. 수소 전환 반응률은 온도, 파라 수소 물분율, 공간속도에 따라 결정되며, 일반적으로 공간속도가 낮아질수록 반응기간이 충분해져 오쏘-파라 수소전환이 향상되는 결과를 보여준다.

2) 다양한 공간속도에 대한 수소 물분율 곡선을 제시하였으며 이는 오쏘-파라 수소전환특성을 나타내는 대표적인 성능곡선으로 수소액화 열교환기의 주요한 설계자료가 된다. 공간속도가 0.2 min⁻¹ 이하에서 파라 수소 물분율이 가시적으로 증가하는 것을

보여주며, 수소 물분율 성능곡선과 함께 압력 및 채널 내 파라 수소 분포 분석을 통하여 수소액화 열교환기의 적절한 공간속도와 채널길이를 설계할 수 있다.

3) 촉매성능이 2배로 개선되면 유효한 공간속도 범위인 0.2-1.0 min⁻¹에서 공간속도와 함께 생산유량도 증가시킬 수 있으며, 채널 내 수소전환 반응률과 파라 수소 물분율 분포의 비교분석을 통하여 촉매성능개선에 따른 공간속도와 채널길이를 설계할 수 있다.

후 기

본 연구는 2021년 국토교통부 재원으로 국토교통과학기술진흥원 국가연구개발사업인 상용급 액체수소 플랜트 핵심기술 개발 사업의 지원을 받아 수행 중인 연구과제(수소액화용 극저온 열교환기 개발)의 연구결과물입니다(No. 21IHTP-B151598-03).

References

1. Ø. Wilhelmsen, D. Berstad, A. Aasen, P. Neksa, and G. Skaugen, "Reducing the exergy destruction in the cryogenic heat exchangers of hydro liquefaction processes", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 10, 2018, pp. 5033–5047, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.094>.
2. J. W. Leachman, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, and E. W. Lemmon, "Fundamental equations of state for para-hydrogen, normal hydrogen, and orthohydrogen", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 38, No. 721, 2009, pp. 721–748, doi: <https://doi.org/10.1063/1.3160306>.
3. M. Lipman, H. Cheung, and O. P. Roberts, "Continuous conversion hydrogen liquefaction", *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 59, 1963, pp. 49–54.
4. P. J. Donaubauer, U. Cardella, L. Decker, and H. Klein, "Kinetics and heat exchanger design for catalytic ortho-para hydrogen conversion during liquefaction", *Chem. Eng. Technol.*, Vol. 42, No. 3, 2019, pp. 669–679, doi: <https://doi.org/10.1002/ceat.201800345>.
5. Y. Liang and J. Yonglin, "Review on the design and optimization of hydrogen liquefaction processes", *Front. Energy*, Vol. 14, 2020, pp. 530–544, doi: <https://doi.org/10.1007/s11708-019-0657-4>.
6. J. Park, H. Lim, G. H. Rhee, and S. W. Kang, "Catalyst filled

- heat exchanger for hydrogen liquefaction”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 170, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121007>.
7. ANSYS, “Fluent theory manual”, 2013.
 8. H. L. Hutchinson, L. F. Brown, and P. L. Barrick, “A comparison of rate expressions for the low-temperature para-ortho-hydrogen shift”, *Advances in Cryogenic Eng.*, Vol. 16, 1970, pp. 96-103, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0244-6_12.
 9. H. L. Hutchinson, P. L. Barrick, and L. F. Brown, “Experimental study of reaction kinetics for para-orthohydrogen at 20° to 80°K”, *Advances in Cryogenic Eng.*, Vol. 10, 1965, pp. 190-196, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4684-3108-7_21.
 10. T. Kim, B. I. Choi, Y. S. Han, and K. H. Do, “Thermodynamic analysis of a hydrogen liquefaction process for a hydrogen liquefaction pilot plant with a small capacity”, *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc.*, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 41-48, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.41>.