

## 초저온 냉각튜브 내 수소기체의 액체수소로의 상변환 분석

이대원 · 홍하이응우엔 · 소명기\* · 나인욱\*\* · 박동화\*\*\* · 김교선†

강원대학교 화학공학과  
24341 강원도 춘천시 강원대학길 1

\*강원대학교 나노응용공학과

24341 강원도 춘천시 강원대학길 1

\*\*한국과학기술연구원 녹색도시기술연구소

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

\*\*\*인하대학교 화학공학과

22212 인천광역시 남구 인하로 100

(2017년 6월 20일 접수, 2017년 7월 28일 수정본 접수, 2017년 8월 18일 채택)

## Analysis of Gas-to-Liquid Phase Transformation of Hydrogen in Cryogenic Cooling Tube

Dae-Won Lee, Hoang Hai Nguyen, Myeong-Ki So\*, In-Wook Nah\*\*, Dong-Wha Park\*\*\* and Kyo-Seon Kim†

Department of Chemical Engineering, Kangwon National University, 1 Gangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, 24341 Korea

\*Department of Nano Applied Engineering, Kangwon National University, 1 Gangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, 24341 Korea

\*\*Green City Technology Institute, Korea Institute of Science and Technology, 5 Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul, 02792 Korea

\*\*\*Department of Chemical Engineering, Inha University, 100 Inharo, Nam-gu, Incheon, 22212 Korea

(Received 20 June 2017; Received in revised form 28 July 2017; accepted 18 August 2017)

### 요 약

에너지 위기 시대를 맞이하여 수소에너지가 가장 가능성 있는 대체에너지 중의 하나로 고려되고 있다. 액체수소는 기체수소와 비교하여 단위 부피당 에너지 밀도가 월등히 높으며 수소에너지의 탁월한 저장 방법으로 간주되고 있다. 본 연구에서는 2 상 모델에 기초를 둔 Navier-Stokes 식을 전산유체역학 프로그램을 이용하여 풀었으며, 초저온 냉각 튜브를 통과하면서 기체수소가 액화되는 과정을 분석하였다. 열전도율이 높은 구리관을 초저온 냉각을 위한 관의 재질로 가정하였다. 기체수소의 유입속도를 5 cm/s, 10 cm/s, 20 cm/s로 변화시키면서 냉각튜브 내 유체 온도분포, 축방향 및 반경방향 유체 속도, 기체 및 액체 수소 부피분율 분포를 각각 분석하였다. 본 연구 결과는 향후 액체수소 제조를 위한 기체수소 초저온 냉각기의 설계 및 제작을 위한 기초자료로 활용이 될 것으로 기대된다.

**Abstract** – Under the era of energy crisis, hydrogen energy is considered as one of the most potential alternative energies. Liquid hydrogen has much higher energy density per unit volume than gas hydrogen and is counted as the excellent energy storage method. In this study, Navier-Stokes equations based on 2-phase model were solved by using a computational fluid dynamics program and the liquefaction process of gaseous hydrogen passing through a cryogenic cooling tube was analyzed. The copper with high thermal conductivity was assumed as the material for cryogenic cooling tube. For different inlet velocities of 5 m/s, 10 m/s and 20 m/s for hydrogen gas, the distributions of fluid temperature, axial and radial velocities, and volume fractions of gas and liquid hydrogens were compared. These research results are expected to be used as basic data for the future design and fabrication of cryogenic cooling tube to transform the hydrogen gas into liquid hydrogen.

Key words: Hydrogen liquefaction, Gas-to-Liquid phase transformation, Nucleation to liquid droplets, Navier-Stokes equations, 2-phase model

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kkyoseon@kangwon.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서 론

수소에너지는 화석연료의 무분별한 사용으로 인한 에너지자원 고갈 문제와 지구온난화의 주범이 되는 이산화탄소 배출에 따른 지구환경적인 문제를 해결하기 위한 미래대체 에너지로 꾸준한 관심을 받고 있다. 현재 수소는 천연가스인 메탄을 고온과 고압에서 증기로 분해하는 증기메탄개질 방법[1]으로 절반가량이 생산되고 있고 물의 전기분해 방법[2]을 통한 생산도 가능하다. 하지만 증기메탄개질 방법은 이산화탄소의 발생 문제, 물의 전기분해는 전기를 생산하기 위한 다른 에너지원 소모해야 하며 이에 따른 폐기물 및 환경오염 문제가 발생할 수 있다. 태양에너지 또는 미생물을 이용한 방법[3,4]이나 광촉매를 이용한 수소생산 방법[5,6]을 이용하여 수소를 생산하면 환경 및 에너지 문제에서 자유로울 수 있지만 아직까지 효율이 낮아서 기술적 보완이 필요하다. 그 외에도 탄화수소 및 석유의 기체화[7]등으로 수소를 제조할 수 있다.

제조한 수소를 효율적으로 사용하기 위해서는 수소의 저장에 매우 중요하다. 수소를 저장하는 대표적인 방법으로는 수소저장합금, 고압수소 저장, 액체수소 저장 방법 등이 있다. 현재 고압수소 저장 방법을 통해 수소에너지를 자동차 연료에 사용하도록 시도하고 있으며, 저장용기의 체적과 무게의 제한 때문에 자동차의 용기 경량화가 필요한 상황이다. 이를 개선하기 위해 단위 부피당 에너지 밀도가 월등히 높아 우수한 저장 시스템 효율을 가지고 있는 액체수소 저장 방법에 관심이 높아지고 있으며, 현재 이를 미래 자동차산업에 적용하기 위한 연구가 증가하고 있다. 특히 세계적으로 액체수소를 자동차 연료[8]와 양성자 교환막 연료전지[9]에 적용하기 위한 연구 등이 꾸준히 진행되고 있으며, 국내에서는 KIST에서 페로브스카이트 촉매를 활용한 수소액화 시스템 개발 및 저장용기에 관한 연구 결과를 발표하였다[10]. 하지만 잠열과 현열로 인한 재기화의 문제점과 액체수소 저장용기의 단열이 완벽히 이루어지지 않는 문제점 등으로 인해 자동차 산업에 바로 적용하기에는 아직까지는 기술적 개선이 필요한 실정이다.

액체수소는 일반적으로 상압에서 기체수소를 20 K 이하로 극저온 냉각하여 과포화상태로 만드는 물리적인 공정을 통해 제조할 수 있다. 과포화도는 어떤 온도에서 용해도에 해당하는 양보다 많은 양의 용질을 포함하고 있는 상태를 말하며 실제 증기압과 포화증기압의 비로 수치화할 수 있다. 본 연구에서의 적용은 불포화 상태인 기체수소를 냉각하면 과포화도가 증가하면서 실제 증기압이 포화증기압 이상에 도달할 때 균질 핵화에 의해 기체상에 새로운 미립자가 생성되며 또한 새로운 미립자는 비균질 응축에 의해 미립자 성장이 일어나면서 기상에서 기체수소의 액체수소로 변환된다. 또한 일정량의 기체수소는 초저온으로 유지되고 있는 냉각관 벽에 확산되어 응축되면서 액체수소로 변환되고 있다[11,12].

본 연구진은 선행 연구로써 단상모델을 이용한 수치모사에 의해 300 K의 기체수소를 25 K로 냉각시킬 때의 냉각 튜브 내 기체의 온도분포, 기체 유속분포 변화에 관련된 유동현상에 대한 연구결과를 발표하였다[13]. 본 연구에서는 300 K의 기체수소를 냉각관을 이용하여 10 K로 냉각시킬 때, 기체수소가 액체수소로 상변환 되는 과정에서의 유동현상 변화 및 상변환율에 대한 수치해석을 전산유체프로그래밍을 이용하여 수행하였다. 특히 기체수소의 유입속도 변화에 따른 냉각관에서의 유동현상 변화 및 액화과정 변화에 대하여 분석하였다. 본 모델 연구는 기체수소로부터 액체수소로 변환시킬

때, 초저온 냉각관의 설계변수를 변화시키면서 최적 설계변수 조건을 도출하는데 활용될 수 있으며, 추후 시스템 제작에 있어서 비용 및 시간 절감의 효과가 지대할 것으로 기대된다.

### 2. 전산 유체 설정 조건

#### 2-1. 구리 냉각 튜브의 기하학적 구조

다른 금속과 비교하여 열전도율이 높은 구리를 냉각관 튜브의 재질로 선택하였고 모델링에 사용된 구리 튜브 냉각관의 전체적인 기하학적인 구조를 Fig. 1과 같이 가정하였다. 구리튜브의 전체 축거리는 50 cm, 벽의 두께는 0.1 cm이며 구리튜브의 내부 직경은 0.4 cm로 설정하였다.

#### 2-2. 전산 유체 모델링 지배식

구리튜브를 통과하는 기체수소의 액화과정을 전산유체프로그램 (Fluent)를 이용하여 수치모사 하였으며 유체에서의 전달현상식인 Navier-Stokes 식을 풀었다 [14]. 냉각관에서 기체수소가 냉각에 의해 액체수소로 변환될 때의 다상계에서의 Navier-Stokes 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

[유체 연속식]

$$\sum_{q=1}^n \left( \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = 0 \tag{1}$$

위의 유체 연속식에서 좌변의 첫 번째 항은 특정지점에서의 시간에 따른 기체 및 액체상 수소량의 변화량을 나타내고 두 번째 항은 대류의 영향을 나타낸다.

[모멘텀 수지식]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + m_{pq} \vec{v}_{pq} - m_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \tag{2}$$

위 모멘텀 수지식에서 좌변의 첫 번째 항은 냉각튜브 내 특정지점에서의 기체 및 액체 수소의 시간에 따른 운동량 변화를 나타내고, 두 번째 항은 대류에 의한 운동량 변화에 주는 영향을 나타내며 우변의 각각의 항은 냉각튜브에서 수소의 기-액 상변환이 발생할 때 압력, 응력, 중력에 의한 운동량 변화에의 영향을 나타내고 있으며 마지막에서 2번째 항은 기체-액체상의 상호작용, 액체-기체 및 기체-액체 상간 속도의 합이 운동량 변화에 끼치는 영향이고, 마지막 항은 외력, 양력, 벽에서의 유히력, 실제 질량속도, 난류 분산력 등이 운동량 변화에 끼치는 영향을 각각 나타내고 있다.

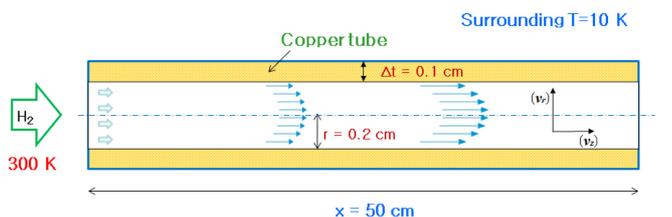


Fig. 1. Geometry of copper cooling tube.

[에너지 수지식]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \vec{\tau}_q \cdot \nabla \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q + S_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \quad (3)$$

위 에너지 수지식에서 좌변의 첫 번째 항은 냉각튜브 내 특정지점에서의 기체 및 액체 수소의 시간에 따른 에너지 변화를 나타내고, 두 번째 항은 대류에 의한 에너지 변화량에의 영향을 나타내며 우변은 냉각튜브에서 수소의 기-액 상변환이 발생할 때 압력, 응력, 열전달, 발생원에 의한 에너지 변화량에의 영향을 나타내고 마지막 항은 기액 간의 열전달, 액체-기체 및 기체-액체 상변환 영향의 합이 에너지 변화에 끼치는 영향을 각각 나타낸다.

[물질 수지식]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (4)$$

위 물질 수지식에서 좌변의 첫 번째 항은 냉각튜브 내 특정지점에서의 시간에 따른 기체 및 액체 수소의 양 변화를 나타내고, 두 번째 항은 대류에 의한 수소 양의 영향을 나타내며 우변은 냉각튜브에서 수소의 기-액 상변환이 발생할 때 수소의 액체-기체 및 기체-액체 상변환 질량속도 영향의 합과 발생원의 영향을 각각 나타낸다.

본 수치모사에서의 초기조건으로 초저온 냉각튜브 입구에서 들어오는 수소기체의 300 K의 온도로 일정한 속도분포를 가지고 들어오는 것으로 가정하였다. 또한 구리튜브 외부 주위와 외벽 사이의 열전달 계수는 15 W/m<sup>2</sup>·K, 구리튜브 외부 주위온도를 10 K로 각각 설정하였다. 초저온 냉각튜브 내부 벽에서의 경계조건으로 수소 기체 물질전달속도는 튜브 내벽에서의 응축 속도와 같으며 유체의 축 방향 속도는 0으로 가정하였다. 초저온 수소 냉각 튜브에서 내부 벽과 수소사이의 열전달을 통해 일어나는 수소 액화과정 및 유동 현상을 분석하기 위하여 축 거리 변화에 따른 수소의 온도, 축방향속도, 반경방향속도, 기체 및 액체수소의 부피분을 변화를 계산하였다.

### 3. 전산모사 결과

구리 튜브 내부와 외부 환경과의 열이 이동하는 경우 두 계면 간의 열전달이 발생하고 계면열전달에 따른 기체수소의 냉각 과정을 확인하였다. 구리튜브와 외부 환경 사이의 열전달 및 유체와 구리튜브 사이에서의 열전달로 인해 300 K의 기체수소가 초저온 구리튜브를 통과하면서 냉각 및 액화가 진행되는데 이 과정을 전산유체프로그래밍을 통하여 분석하였다. 본 전산유체모사에서는 냉각튜브가 Fig. 1과 같은 기하학적 구조를 가지고 있을 때, 기체수소의 유입속도를 각각 20 cm/s, 10 cm/s, 5 cm/s로 변경시키면서 다양한 축 및 반경 거리에 따라 기체수소의 온도, 축방향속도, 반경방향속도, 기체 및 액체수소의 부피분을 변화에 대하여 비교 분석하였다.

#### 3-1. 기체수소 유입속도, 20 cm/s 에서의 수소 액화용 냉각튜브 전산모사 결과

수소 액화를 위한 구리튜브를 들어오는 기체수소의 유입속도가

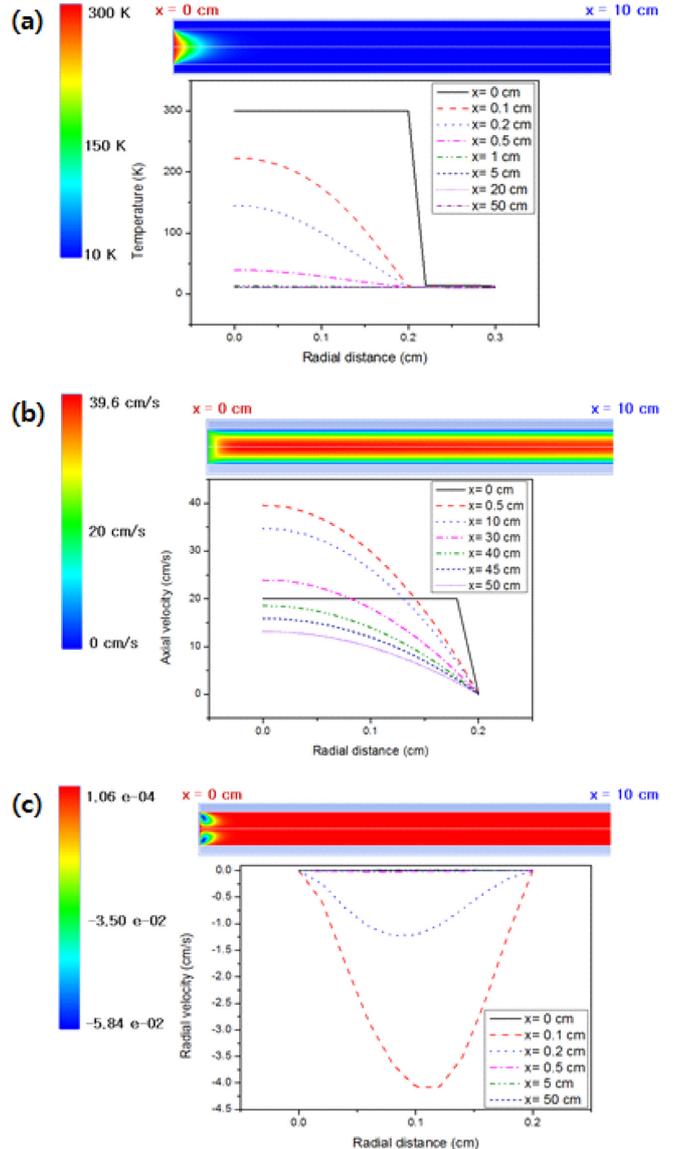


Fig. 2. Changes of (a) temperature (b) axial velocity (c) radial velocity as a function of radial distance for various axial distances with average gas velocity of 20 cm/s at inlet.

20 cm/s 일 때 전산유체모사 결과를 통하여 다양한 축 거리에서의 온도, 축방향 및 반경방향 유체속도, 기체 및 액체수소의 부피분에 대하여 각각 계산하였다.

Fig. 2는 20 cm/s의 유입속도를 가지는 기체수소가 구리튜브를 통과할 때 다양한 축 거리에서의 반경 거리에 따른 (a) 유체온도, (b) 축 방향 유체속도, (c) 반경 방향 유체속도를 나타냈다. Fig. 2(a)에서는 기체수소가 구리튜브를 통과하면서 온도가 감소하고 있으며 축거리가 증가함에 따라 열전달 냉각에 의해 온도가 급격히 감소하는 것을 보이고 있다. 또한 구리튜브의 중앙보다 열전달이 빨리 되는 벽 근처 위치(0.2 cm-0.3 cm)에서는 유체온도가 외부 환경 온도와 같은 10 K로 빠르게 냉각되는 것을 보이고 있다. 또한 냉각 튜브의 내부 반경 길이가 0.2 cm로 매우 작아서 반경방향으로의 냉각이 전체적으로 빠르게 진행되고 있으며 냉각관 후반부에서는 전체 반경영역에 걸쳐서 기체온도가 10 K을 유지하는 것을 보이고 있다. Fig. 2(b)에서는 축거리가 증가할수록 냉각에 의해 기체온도

가 급격히 감소함에 따라 수소기체의 부피가 감소하고 있으므로 축방향 기체속도가 빠르게 감소하는 것을 보이고 있다. 또한 튜브 입구에서 flat 한 속도분포를 가지면서 들어 온 기체가 튜브 내에서 층류에서의 parabolic 속도분포를 가지게 됨에 따라 축거리가 0.5 cm 일 때 축방향 기체속도가 39.6 cm/s로 가장 높게 나타나고 있으며 튜브 벽 지점( $r=0.2$  cm)에서는 벽과의 마찰에 의해 기체속도가 0 cm/s 인 것을 보이고 있다. 냉각이 거의 완료된 냉각기 후반부에서도 기체의 축방향 속도가 계속 감소하는 이유는 (i)기체수소가 구리관 안쪽으로부터 극저온의 튜브벽 쪽으로 확산되어 구리벽에서 응축되어 액체수소로 변환되고 있고, (ii)기체수소가 극저온 상태의 구리관 내에서 균질 핵화 및 비균질 응축에 의해 액화되어 수소액적의 생성 및 성장이 일어나기 때문이다. Fig. 2(c)에서는 반경방향 유체속도가 전체적으로 음수로 나타나고 있음을 보이고 있으며 이는 구리 냉각튜브를 지나는 냉각되는 기체수소가 튜브 벽 쪽으로부터 튜브 중앙 방향으로 흐르고 있는 것을 의미하며, 냉각튜브에서 급격한 냉각에 의하여 기체 부피의 수축이 일어날 때 모멘텀 수지칙을 만족시키기 위하여 구리튜브를 지나는 기체수소가 튜브 벽 쪽으로부터 튜브 중앙 방향으로 이동하고 있음을 보이고 있다. 특히 냉각 튜브 초기 부분에서 기체의 반경방향 속도가 현저히 크게 나타나고 있는데, 이는 냉각튜브 입구에서 flat 속도분포를 가지고 들어온 수소기체가 튜브 내 층류 흐름에서의 parabolic 속도분포로 변화하기 때문에 반경방향 기체속도가 튜브 안쪽으로 크게 나타나고 있음을 보이고 있다. 냉각기 초기에서는 안쪽으로 흐르는 반경방향 기체속

도에 의해 반경방향으로의 열전달속도가 현저하게 증대될 수 있음을 보이고 있다. 또한 반경방향 기체속도가 튜브 벽과 튜브 중앙에서는 0 cm/s 나타나서 두 지점에서 요구되는 경계조건을 만족시키고 있음을 확인할 수 있었으며, 튜브 벽과 중앙 사이에서 최댓값을 가지고 있음을 보이고 있다. 기체속도 분포가 튜브 내의 parabolic 속도분포로 변화되고 냉각이 거의 완료된 냉각기 후반부에서는 반경방향 기체속도가 거의 0으로 나타나고 있다.

Fig. 3에서는 20 cm/s의 유입속도를 가지는 기체수소가 구리튜브를 통과할 때 축거리와 반경거리 변화에 따른 기체상의 기체수소와 액체수소의 부피분율 변화를 Fig. 3(a)와 (b) 각각 나타냈다. 수소기체의 냉각이 튜브 벽 근처에서부터 먼저 일어나서 튜브 중앙 쪽으로 전파되기 때문에 액체수소 분율이 튜브 벽 쪽에서부터 먼저 증가하고 튜브 중앙 쪽에서는 나중에 증가함을 알 수 있다. 액체수소는 기체수소가 비등점 이하로 냉각되어 과포화된 상태에서 균질 핵화 및 비균질 응축 과정을 거쳐서 액체로 변환되는데, 이 때 액체수소 분

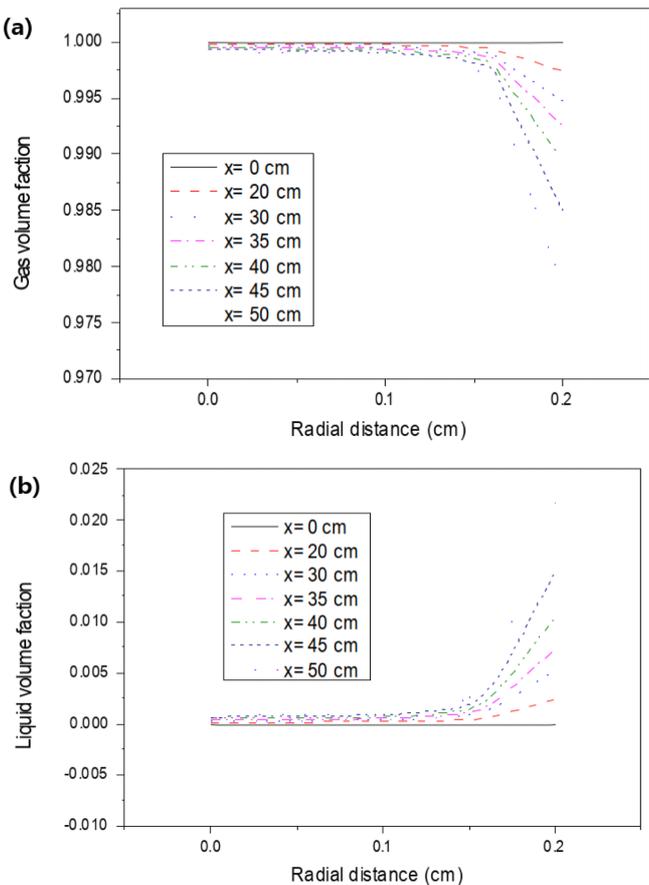


Fig. 3. Changes of (a) gas (b) liquid volume fractions as a function of radial distance for various axial distances with average gas velocity of 20 cm/s at inlet.

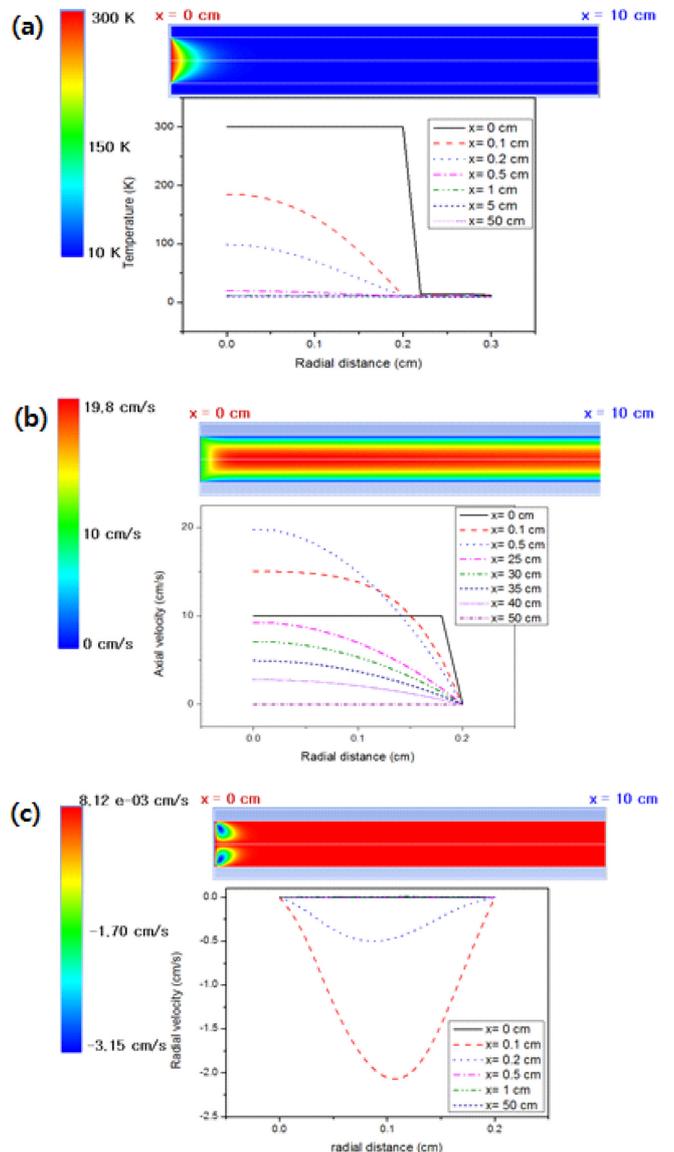


Fig. 4. Changes of (a) temperature (b) axial velocity (c) radial velocity as a function of radial distance for various axial distances with average gas velocity of 10 cm/s at inlet.

율은 균질 핵화 속도 및 비균질 응축 속도와 과포화 상태에 머문 시간에 의존하게 되며, 튜브 벽에 가까운 지점의 축방향 유체 속도가 튜브 센터 쪽에서보다 느리기 때문에 튜브 벽에 가까운 지점의 유체는 과포화 상태에 머문 체류시간이 길기 때문에 액체수소 분율이 크게 나타나고 유체속도가 빠른 튜브 중앙 쪽에서는 액체수소 분율이 낮게 나타나게 된다. 또한 축거리가 증가할수록 수소가 냉각되면서 수소의 액화가 일어나므로 유체 내 액체수소의 부피 분율은 증가하는 반면에 기체수소의 부피분율은 감소하는 것을 보이고 있다. 본 전산유체모사 조건에서 구리튜브의 길이인 50 cm 까지 통과할 때까지 약 2%의 기체수소가 액화되는 것을 보이고 있다.

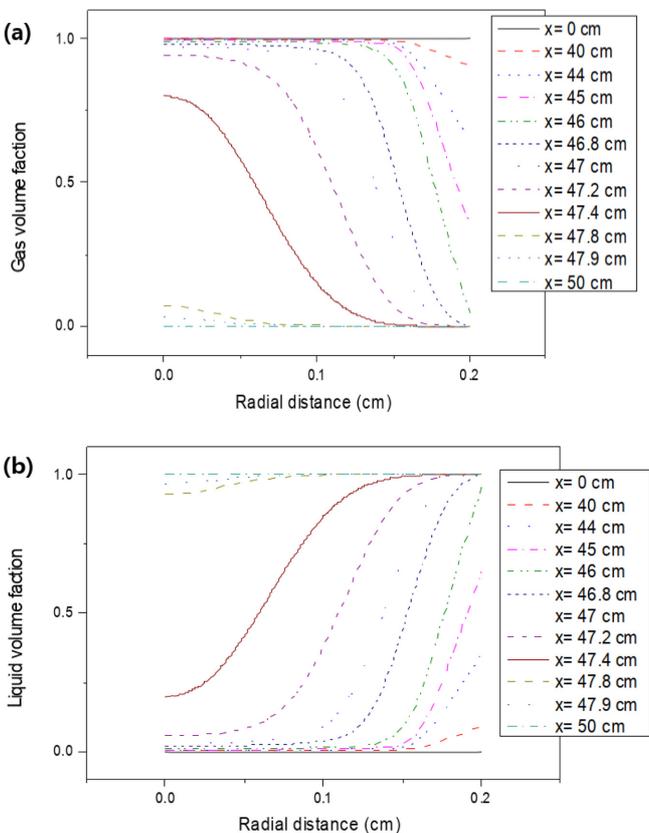
**3-2. 기체수소 유입속도, 10 cm/s 에서의 수소 액화용 냉각튜브 전산모사 결과**

구리튜브를 통과하는 기체수소의 튜브 입구에서의 유입속도가 10 cm/s 일 때 기체온도, 축방향 및 반경방향 기체속도, 기체 및 액체수소의 부피분율을 계산하였으며 전체적인 계산 결과는 20 cm/s의 유입속도를 가진 기체수소의 전산유체모사 결과와 정성적으로 유사한 경향성을 보였다.

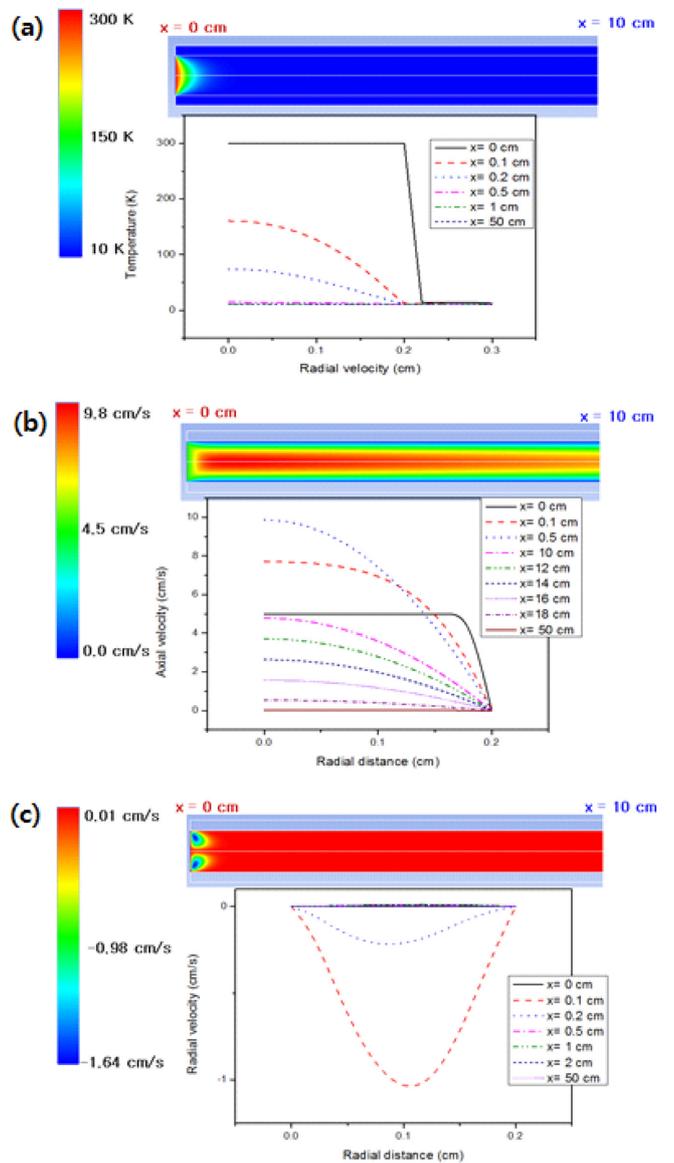
Fig. 4는 10 cm/s의 기체 유입속도를 가지는 기체수소가 구리튜브를 통과할 때 다양한 축 거리에서의 반경 거리에 따른 (a) 유체온도, (b) 축방향 유체속도, (c) 반경방향 유체속도와의 관계를 나타냈다. Fig. 4(a)의 유체온도 결과에서 Fig. 2(a)의 결과와 비교하여 볼 때 유체속도가 느리기 때문에 같은 축거리에서 냉각이 더욱 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(b)의 축방향 유체속도에

서도 Fig. 2(b)에 비하여 빠르게 유체속도가 감소함을 보이고 있으며, 축 거리가 0.5 cm일 때 중앙에서의 최대 축거리 방향 유체속도는 19.8 cm/s를 가지고 있음을 보이고 있다. 특히 냉각튜브 출구 부근(축거리~50 cm)에서는 상당량의 기체수소가 액체수소로 상변환 되어 (Fig. 5(b) 참조), 유체의 부피가 급격히 감소하므로 축방향 유체속도가 아주 작게 나타나고 있다. Fig. 4(c)의 반경방향 유체속도는 유체의 냉각속도가 빠른 냉각튜브 초기단계에서 빠르게 나타나고 있으며, Fig. 2(c) 결과에 비하여 전체 유체속도가 느리기 때문에 반경방향 유체속도도 낮게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5은 10 cm/s의 유입속도를 가지는 기체수소가 구리 냉각튜브를 통과할 때 여러 축거리에서 (a) 기체수소와 (b) 액체수소의 부피 분율을 반경거리의 함수로 나타냈다. 열전달이 빨리 시작된 튜브 벽 근처에서는 액체수소가 빨리 나타나기 시작하여 점점 기체수소가 액체수소로 상 변환되었고 약 47 cm에서 기체수소가 액체수소로 100% 상변환되어 있음을 알 수 있다. 반면에 튜브 중앙 근처



**Fig. 5. Changes of (a) gas (b) liquid volume fractions as a function of radial distance for various axial distances with average gas velocity of 10 cm/s at inlet.**



**Fig. 6. Changes of (a) temperature (b) axial velocity (c) radial velocity as a function of radial distance for various axial distances with average gas velocity of 5 cm/s at inlet.**

에서는 냉각에 상대적으로 시간이 오래 걸렸고, 또한 축방향 유체 속도가 빠르기 때문에 과포화 상태에 머문 시간이 짧아서 균질 핵화 및 비균질 응축된 양이 작아서 냉각튜브 출구(50 cm)에서 약 20% 정도의 액체수소 분율을 나타내고 있다.

### 3-3. 기체수소 유입속도, 5 cm/s 에서의 수소 액화용 냉각튜브 전산모사 결과

Fig. 6은 기체수소가 5 cm/s의 유입속도로 냉각튜브에 들어올 때 다양한 축거리에서의 (a) 유체온도, (b) 축 방향 유체속도, (c) 반경 방향 유체속도를 반경 거리의 함수로 나타냈다. Fig. 6(a)에서 수소 기체 유입속도가 5 cm/s로 느리기 때문에 Fig. 2(a) 및 Fig. 4(a)에 비하여 같은 축거리에서 볼 때 냉각이 더욱 빠르게 진행되고 있으며 냉각튜브 초기 부분에서 냉각이 거의 종료되고 있음을 보이고 있다. 또한 Fig. 6(b)의 축방향 유체속도에서도 Fig. 2(b), Fig. 4(b)에 비하여 빠른 냉각에 의해 유체속도가 빠르게 감소함을 보이고 있으며, 축 거리가 0.5 cm 일 때 층류에서의 parabolic 속도분포를 보이고 있으며, 중앙에서의 최대 축거리 방향 기체속도는 9.8 cm/s를 보이고 있다. 특히 느린 유속으로 인하여 과포화 상태에 머문 시간이 급격히 증가하여 균질 핵화 및 비균질 응축된 양이 많아져서 기체수소가 액체수소로의 상변환이 전체적으로 빠르게 진행된다 (Fig. 7(b) 참조). 기체수소에서 액체수소로의 상변환에 의해 유체의 부피가 급격히 감소하게 되므로 축방향 거리가 20 cm 이상에서는 축방향 유체속도가 아주 작게 나타나고 있다. Fig. 6(c)에서도 반경 방향 유체속도는 유체의 냉각속도가 빠른 냉각튜브 초기단계에서

빠르게 나타나고 있으나, 냉각튜브 초기 부분에서 냉각이 거의 종료되므로 그 이후에는 반경방향 유체 속도가 0으로 나타나고 있다. Fig. 7은 5 cm/s의 느린 유입속도를 가질 때 여러 축거리에서의 (a) 기체수소와 (b) 액체수소의 부피분율을 각각 반경거리의 함수로 나타냈다. 여기에서도 냉각이 빨리 일어나고 유체 속도가 느린 튜브 벽 근처에서부터 액체수소가 먼저 나타나기 시작한 반면에 냉각이 늦게 일어나고 유체 속도가 빠른 튜브 중앙 근처에서는 액체수소로 상변환되는데 시간이 더 걸리고 있다. 이 조건에서는 축거리가 약 20 cm에 근처서 기체수소가 액체수소로 100% 상변환 되는 것을 보이고 있다.

## 4. 결 론

수소에너지의 액체수소 저장법은 다양한 다른 저장 방법에 비하여 단위 부피당 에너지가 월등히 높은 장점을 가지고 있기 때문에 세계 각지에서 꾸준한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 Navier-stokes 식에 기초를 둔 전산유체 프로그램을 사용하여 기체수소가 액체수소로 상변환 되는 과정을 분석하였다. 열전도율이 높은 구리를 초저온 냉각튜브의 재료로 가정하였고, 축거리 및 반경거리 변화에 따른 유체온도 분포, 축방향 및 반경방향 유체속도 분포, 기체 및 액체 수소의 부피 분율 분포에 대한 결과를 얻었다. 특히 구리 냉각튜브를 통과하는 기체수소의 유입속도를 각각 5 cm/s, 10 cm/s, 20 cm/s로 변화시켰을 때의 전산모사 결과를 비교 분석하였다. 기체수소의 액체수소로의 상변환을 분석 결과에서 기체수소의 유입속도가 20 cm/s 일 때는 냉각튜브 출구에서의(축거리=50 cm) 상변환율이 약 2%였지만, 기체수소의 유입속도를 10 cm/s, 5 cm/s로 감소시킨 결과 축거리가 각각 47 cm, 20 cm에서 액체수소로의 상변환율이 100%로 나타났다. 본 모델 결과는 에너지 위기에 액체수소를 상용화하여 사용하게 될 경우, 기체수소를 액화하여 액체수소 제조를 위한 냉각기의 설계 및 제작을 위한 기초자료로 충분히 활용이 될 것으로 기대된다. 구체적으로 수소액화를 위한 냉각 시스템을 제작하기 전에 본 연구에 기초를 둔 전산유체프로그램을 사용하여 시스템 설계 결과를 미리 예측함으로써 실제 냉각 시스템 제작에 있어서의 시행착오를 줄일 수 있으며 이에 따른 시간 및 비용 절감에 큰 효과가 있을 것으로 기대할 수 있다.

## 감 사

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2016R1A2B4008876). 이 논문은 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-520160130).

## Nomenclature

$t$	: time [s]
$P_{rq}$	: gas phase reference density [Kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha_q$	: gas volume fraction [dimensionless]
$\rho_q$	: gas density [Kg/m <sup>3</sup> ]
$\vec{v}_q$	: gas velocity vector [m/s]
$\dot{m}_{pq}$	: mass flow rate from liquid to gas phase [Kg/s]

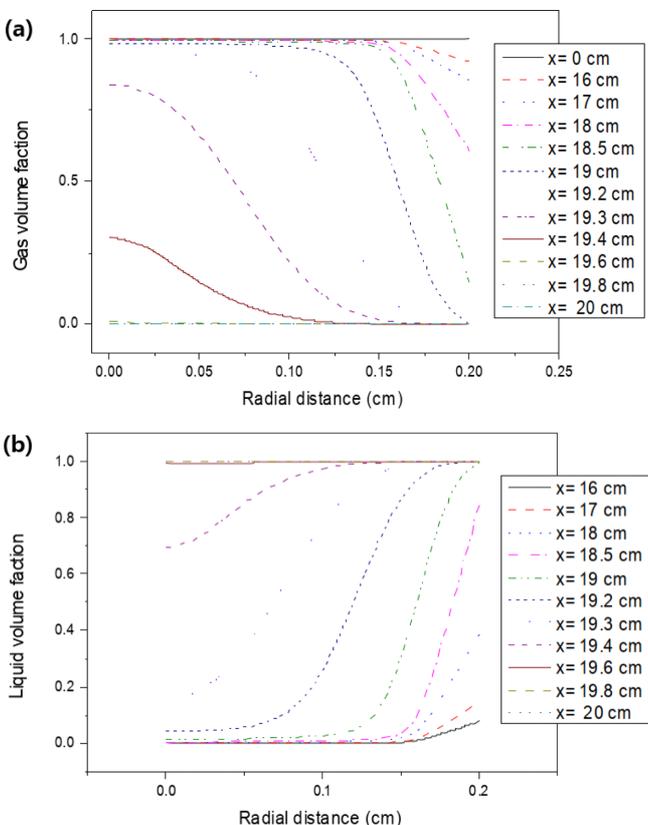


Fig. 7. Changes of (a) gas (b) liquid volume fractions as a function of radial distance for various axial distances with average gas velocity of 5 cm/s at inlet.

$\dot{m}_{qp}$	: mass flow rate from gas to liquid phase [Kg/s]
$\bar{\tau}_q$	: stress tensor [Pa]
$\bar{g}$	: gravitational acceleration [m/s <sup>2</sup> ]
$\vec{R}_{pq}$	: interaction force between gas and liquid phase vector [N]
$\vec{v}_{pq}$	: interphase velocity from liquid to gas [m/s]
$\vec{v}_{qp}$	: interphase velocity from gas to liquid [m/s]
$\vec{F}_q$	: external body force vector [N]
$\vec{F}_{lift,q}$	: lift force vector [N]
$\vec{F}_{wl,q}$	: wall lubrication force vector [N]
$\vec{F}_{vm,q}$	: virtual mass force vector [N]
$\vec{F}_{td,q}$	: turbulent dispersion force vector [N]
$h_q$	: specific enthalpy [W/g]
$\vec{u}_q$	: gas velocity [m/s]
$\vec{q}_q$	: heat flux [W/m <sup>2</sup> ]
$S_q$	: source term [g/cm <sup>3</sup> ·s]
$Q_{pq}$	: intensity of heat exchange between liquid and gas phase [W]
$h_{pq}$	: interphase enthalpy from liquid to gas [W/g]
$h_{qp}$	: interphase enthalpy from liquid to gas [W/g]

## References

- Simpson, A. P. and Lutz, A. E., "Exergy Analysis of Hydrogen Production Via Steam Methane Reforming," *Int. J. Hydrogen Energy*, **32**, 4811-4820(2007).
- Stojic, D. L., Marceta, M. P., Sovilj, S. P. and Miljanic, S. S., "Hydrogen Generation From Water Electrolysis—possibilities of Energy Saving," *J. Power. Sources.*, **118**, 315-319(2003).
- Yildiz, B. and Kazimi, M. S., "Efficiency of Hydrogen Production Systems Using Alternative Nuclear Energy Technologies," *Int. J. Hydrogen Energy*, **31**, 77-92(2006).
- Kang, K., Azargohar, R., Dalai, A. K. and Wang, H., "Hydrogen Production From Lignin, Cellulose and Waste Biomass via Supercritical Water Gasification: Catalyst Activity and Process Optimization Study," *Energy Conversion and Management*, **117**, 528-537(2016).
- Ding, J. R. and Kim, K. S., "Facile Growth of Nanowire-structured WO<sub>3</sub> Thin Films for Photoelectrochemical Water Splitting," *AIChE J.*, **62**, 421-428(2016).
- Kim, D. J., Han, G. B., Park, N. K., Lee, T. J. and Kang, M. S., "Hydrogen Production from Splitting of Methanol/Water Solution Using Perovskite Structured Nb<sub>x</sub>SrTi<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub> Photocatalysts," *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(4), 513-517(2013).
- Zeng, K. and Zhang, D., "Recent Progress in Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production and Applications," *Prog. Energy. Combust. Sci.*, **36**, 307-326(2010).
- Acoves, S. M., Espinosa-Loza, F., Ledesma-Orozco, E., Ross, T. O., Weisberg, A. H., Brunner, T. C. and Kircher, O., "High-density Automotive Hydrogen Storage with Cryogenic Capable Pressure Vessels," *Int. J. Hydrogen Energy*, **35**, 1219-1226(2010).
- Khorasany, R. M. H., Singh, Y., Sadeghi, A. A., Kjeang, E., Wang, G. G. and Rajapakse, R. K. N. D., "Fatigue Properties of Catalyst Coated Membranes for Fuel Cells: Ex-situ Measurements Supported by Numerical Simulations," *Int. J. Hydrogen Energy*, **41**, 8992-9003(2016).
- Das, T., Kweon, S. C., Chol, J. G., Kim, S. Y. and Oh, I. H., "Spin Conversion of Hydrogen over LaFeO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts at Low Temperature: Synthesis, Characterization and Activity," *Int. J. of the Hydrogen Energy*, **40**, 383-391(2015).
- Kang, S. K., Powder Technology, Hoejungdang, Seoul (1995).
- Song, Y. S. and Katz, J. L., "A Study on Heterogeneous Nucleation: The Condensation of Water Vapor on n-Hexadecane," *Korean Chem. Eng. Res.*, **40**(1), 34-42(2002).
- Lee, D. W., Nguyen, H. H., Nasonova, A., Oh, I. H. and Kim, K. S., "Analysis on Fluid Dynamics in the Cooling Tube for Manufacture of Liquid Hydrogen," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **26**, 301-307(2015).
- Geankoplis, C. J., "Transport Processes and Separation Process Principles (include unit operation)," Pearson education international, 4th, 193-209(2003).