

액체수소 제조를 위한 냉각튜브 내 유동장 해석

이대원¹ · 홍하이응우엔¹ · 나소노바 안나¹ · 오인환^{2†} · 김교선^{1†}
¹강원대학교 화학공학과, ²한국과학기술연구원 녹색도시기술연구소

Analysis on Fluid Dynamics in the Cooling Tube for Manufacture of Liquid Hydrogen

DAE-WON LEE¹, HOANG HAI NGUYEN¹, ANNA NASONOVA¹, IN-HWAN OH^{2†}, KYO-SEON KIM^{1†}

¹Department of Chemical Engineering Kangwon National University, 200-701, Chuncheon, Kangwon-Do, Korea
²Green City Technology Institute of Science and Technology, 39-1 Wolgok-2dong, Sungbuk-gu Seoul, 136-791, Korea

Abstract >> We present a study of hydrogen liquefaction using the CFD (Computational Fluid Dynamics) program. Liquid hydrogen has been evaluated as the best storage method because of high energy per unit mass than gas hydrogen, but efficient hydrogen liquefaction and storage are needed in order to apply actual industrial. In this study, we use the CFD program that apply navier-stokes equation. A hydrogen is cooled by heat transfer with the while passing gas hydrogen through Cu tube. We change diameter and flow rate and observe a change of the temperature and flow rate of gas hydrogen passing through Cu tube. As a result of, less flow rate and larger diameter are confirmed that liquefaction is more well. Ultimately, When we simulate the hydrogen liquefaction by using CFD program, and find optimum results, it is expected to contribute to the more effective and economical aspects such as time and cost.

Key words : Hydrogen liquefaction(수소 액화), Modeling of cooling tube(냉각 튜브 모델링), CFD(전산유체역학), Navier-Stokes equation(내비어-스톡스 방정식), Temperature and gas velocities profiles(온도 및 기체유속 분포)

Nomenclature

t	: time, s	ρg	: gravitational body force
ρ	: density of gas hydrogen, g/cm ³	S	: source term, g/s·cm ³
$\vec{\nu}$: velocity of gas hydrogen, m/s	E	: energy, J
τ	: stress tensor, g/cm ²	P	: static pressure, Pa
$\tau^{(t)}$: turbulent momentum flux tensor, J/cm ²	k_{eff}	: effective thermal conductivity, J/m·K
		T	: temperature, K
		h_i	: enthalpy of species i, cal/g
		J_i	: diffusive flux of species i, g/cm ³ ·s
		Y_i	: mass fraction of species i,
		$M_{w,i}$: molecular weight of species i, g/mol

[†]Corresponding author : kkyoseon@kangwon.ac.kr
oih@kist.re.kr

R_i : arrhenius molar rate of creation/destruction of species i , mol/s

1. 서 론

수소에너지는 미래 자동차산업 및 우주개발에 필수적으로 사용될 것으로 예상되며 화석연료 등의 무분별한 사용으로 인한 고갈과 환경적인 오염 등의 문제를 해결하기위해 향후 미래대체 에너지로 꾸준한 관심을 받고 있다. 세계적으로 수소에너지를 자동차 연료 등에 적용시키는 연구가 꾸준히 개발되고 있고¹⁻²⁾ 국내에서는 수소액화 시스템 및 액화기에 대해 KIST에서 활발하게 연구가 진행되고 있다³⁻⁴⁾.

다양한 저장방법 중에서 액체수소는 기체수소보다 단위질량당 에너지가 월등히 높아 가장 우수한 저장방법으로 평가되고 있다. 하지만 액화된 수소가 그 온도에 맞는 체적비로 변환 할 때 변환열이 발생하고 수소기체가 열 때문에 다시 기화되는 문제점⁵⁾으로 인해 액화수소가 실제 산업에 성공적으로 적용될 수 있도록 효율적인 수소액화와 저장방법은 여전히 과제로 남아있다. S. Ubaid 등은 수소변환과 수소저장에 대한 시뮬레이션 연구를 발표하였고⁶⁾, 본 연구에서는 전산모사프로그램을 이용해 수소액화기 및 액화수소 저장용기의 설계 및 공정변수 변화에 따른 모델 예측을 진행한 후 수소액화 시스템의 설계 개선 방안을 도출하고 액화수소 저장용기가 최대의 성능을 가질 수 있도록 설계하도록 하는데 있다. 전산유체프로그램은 실제 실험을 하지 않고서도 효율적으로 기체수소의 액화나 저장 등의 예측을 도와줄 수 있는 매우 유용한 도구이기 때문에 이 프로그램을 통해 최적의 기하학적인 구조와 조건 등을 확립한다면 시스템 및 제품의 제작에 있어 시행착오를 줄일 수 있으며 개선방안을 찾거나 응용하는 과정에도 많은 장점을 가져올 것으로 예상된다.

2. 냉각튜브 전산모사

2.1 전산모사식

구리튜브를 통과하는 기체수소의 액화과정은 공기나 물 등 유체에 대한 운동방정식인 Navier-Stokes 식을 전산모사프로그램에 해석함으로써 구할 수 있다⁷⁾. 본문에서 해석되는 Navier-Stokes 식은 다음과 같다.

- 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

식 (1)은 전체 질량보존을 표현하는 수학적인 연속방정식이다. 좌변의 첫 번째 항은 밀도의 변화량을 나타내며 두 번째 항은 기체수소가 단위체적당 들어오거나 나가는 유량의 질량차이를 나타낸다.

- 모멘텀 수지식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p - \nabla \cdot \tau - \nabla \cdot \tau^{(t)} + \rho g + S \quad (2)$$

식 (2)는 구리튜브 내 기체의 운동량 변화를 표현한 식이다. 좌변의 첫 번째 항은 모멘텀의 변화량을 나타내며 두 번째 항은 대류의 영향을 나타낸다. 우변의 첫 번째 항은 압력의 영향이고 두 번째 항은 응력의 영향이며 세 번째 항은 난류 모멘텀 응력의 영향이고 네 번째 항은 중력 체적력이며 마지막 항은 생성항이다.

- 에너지 수지식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i + (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \right] + S_h \quad (3)$$

식 (3)은 구리튜브 내 기체의 에너지 보존을 표현한 식이다. 좌변의 첫 번째 항은 에너지의 변화량을 나타내고 두 번째 항은 대류의 영향을 나타낸다. 우변의 괄호 안의 항은 각각 온도의 영향과 기체의 확산 및 엔탈피의 영향을 나타내고 괄호 밖의 항은 기체수소와 상호작용을 포함하는 생성항이다.

• 각 화학종의 물질 수지식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + M_{w,i} R_i \quad (4)$$

이 식은 구리튜브내 기체의 질량 변화 속도를 표현한 식이다. 좌변의 첫 번째 항은 질량 변화량을 나타내며 두 번째 항은 대류의 영향을 나타낸다. 우변의 첫 번째 항은 확산의 영향을 나타내며 두 번째 항은 반응속도의 영향을 나타낸다.

본 연구에서의 주요 목표는 Navier-Stokes 식을 해석시킨 전산모사프로그램을 통해 구리튜브의 내경과 기체수소의 유량을 변화시키면서 구리튜브를 통과하는 기체수소의 열전달에 의한 냉각에서 수소의 온도 변화 및 기체유속변화를 확인하고 최적의 조건을 찾아 효율적인 공정시스템 및 수소냉각액화기의 설계 자료 등에 도움을 주는데 있다.

2.2 냉각튜브의 기하학적인 구조

구리는 다른 금속에 비해 열전달이 매우 잘되므로 튜브의 재질은 구리를 선택했다.

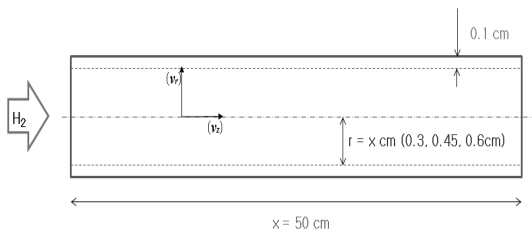


Fig. 1 Geometry of copper tube

시뮬레이션에 사용된 구리튜브는 축거리가 50 cm이며 벽두께는 위와 아래의 벽이 모두 0.1 cm이다. 이때 들어오는 수소기체의 온도는 300 K, 벽의 열전달 계수와 구리튜브 바깥쪽온도는 각각 15 W/m²·K와 25 K으로 각각 설정하였다. 구리튜브의 내경과 기체수소의 유량에 따라 결과를 비교하기 위해 각각 다르게 설정하면서 시뮬레이션을 진행하였다.

2.3 전산모사 기법

전산유체프로그램을 통해 300 K의 수소기체가 구리튜브를 통과하면서 외부와의 열전달로 인해 냉각이 이루어지는데 이 때 수소의 온도감소가 얼마나 이루어지는지 확인하였다. 본문에서는 최적의 기하학적인 조건을 알아보기 위해 구리튜브의 내경은 0.9 cm이고 기체수소의 유량은 6 g/h를 기준조건으로 설정한 뒤에 구리튜브의 내경을 다르게 하는 방법과 기체수소의 유량의 조건을 다르게 하는 방법 등 두 가지로 나눠서 전산모사를 진행하였다. 먼저 기체수소의 유량을 6 g/h로 설정한 뒤 구리튜브의 내경을 각각 0.6 cm, 0.9 cm, 1.2 cm로 변경하면서 진행하였고 두 번째는 구리튜브의 내경을 0.9 cm로 고정시킨 뒤 기체수소의 유량을 각각 3 g/h, 6 g/h, 12 g/h로 변경하면서 진행하였다. 그 외 냉각튜브의 기하학적인 구조와 공정 변수의 값은 모두 앞에 설명한 값으로 동일하게 설정하였다. 이때 축거리 변화에 따른 반경거리와 온도, 축거리 속도 및 반경거리 속도를 각각 비교하였다.

3. 전산모사 결과

3.1 기준조건에서의 전산모사 결과

구리튜브의 내경과 기체수소의 유량을 다르게 할 때 어떤 변화가 생기는데에 대한 비교를 하기 위해 기준이 되는 구리튜브의 내경과 기체수소의 유량을

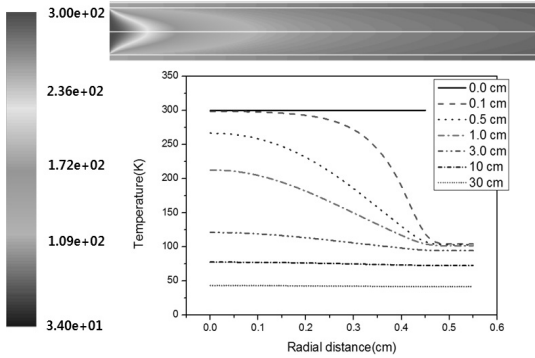


Fig. 2 Change of gas temperature as a function of radial distance for various axial distances

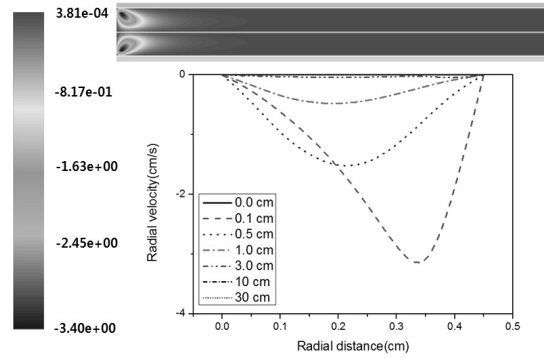


Fig. 4 Change of radial gas velocity as a function of radial distance for various axial distances

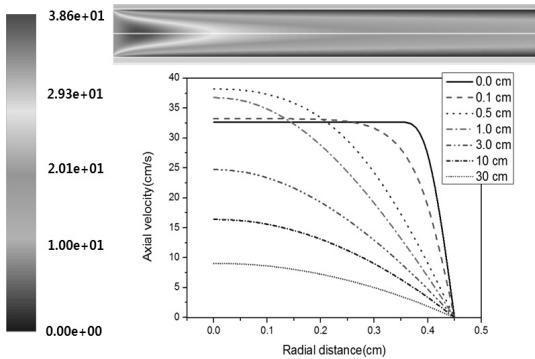


Fig. 3 Change of axial gas velocity as a function of radial distance for various axial distances

0.9 cm와 6 g/h로 각각 정한 뒤 시뮬레이션을 진행하였다.

Fig. 2, Fig. 3 과 Fig. 4를 통해서 축거리 변화에 따른 온도, 축방향속도, 반경방향속도를 반경거리의 함수로 나타내었다. Fig. 2는 축거리 변화에 따른 반경거리 와 온도와의 관계를 나타낸 것으로 반경거리가 커질수록 열전달에 의한 냉각 때문에 온도가 감소하는 것을 확인 할 수 있었으며 벽 내부(0.45 cm ~0.55 cm)에서는 외부와 구리튜브의 열전달 속도가 빨라 전체구간에 걸쳐 거의 일정한 낮은 온도로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 축거리가 30 cm고 반경거리가 구리튜브 중앙에 있을 때 온도는 약 43 K으로 나타났다. 또한 축거리가 적을수록 온도가 급격한 감소를 보였지만 축거리가 증가할수록 거의 일정

한 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 축거리 변화에 따른 반경거리와 축방향속도와의 관계를 나타낸 것이다. 그래프를 확인하면 축거리가 커질수록 온도가 감소하고 이상기체 방정식에 의해 부피가 감소하기 때문에 기체유속이 감소함을 확인할 수 있다. 축거리가 30 cm고 반경거리가 구리튜브 중앙에 있을 때 축방향속도는 약 0.09 m/s인 것을 확인할 수 있고 벽에 가까워질수록 기체유속이 감소하고 벽 지점인 0.45 cm에서는 축방향속도가 없음을 확인할 수 있다. 또한 구리튜브의 입구에서는 평평한 형태의 속도분포지만 축거리가 증가할수록 처음의 분포보다 안쪽으로 들어가는 포물선형태의 속도분포로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 반경속도가 음수로서 구리튜브를 지나는 기체수소가 튜브 벽으로부터 중앙 쪽으로 이동해 구리튜브 중앙의 속도가 벽 근처에서의 속도보다 빠른 것을 확인 할 수 있다. 또한 냉각속도가 빠른 초기단계에서 반경방향의 기체유속이 빠른 것을 확인 할 수 있다.

3.2 구리튜브의 내경 변화에 따른 수치모사 결과

기체수소의 유량은 6 g/h로 동일하게 하고 구리튜브의 내경을 0.6 cm와 1.2 cm로 변경시켰을 때 변화를 확인하였다.

구리튜브의 내경이 모두 달라 내경에 대한 단순비

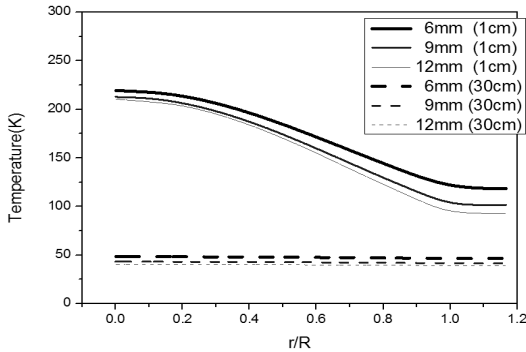


Fig. 5 Comparison of gas temperature profiles for different inner tube diameters at the axial distances of 1 and 30cm

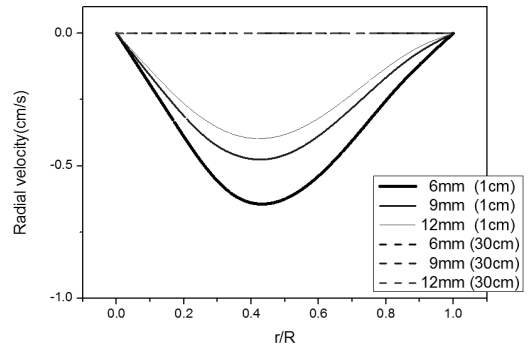


Fig. 7 Comparison of radial gas velocity profiles for different inner tube diameters at the axial distances of 1 and 30cm

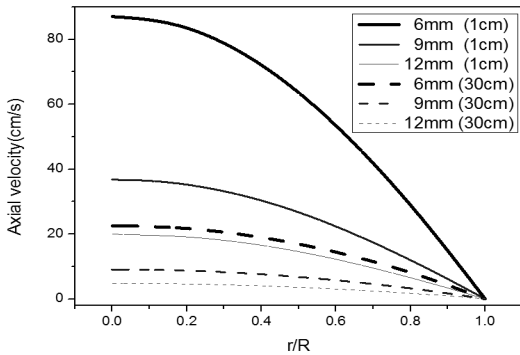


Fig. 6 Comparison of axial gas velocity profiles for different inner tube diameters at the axial distances of 1 and 30cm

고는 어렵기 때문에 r (지점 반경거리)/ R (최대 반경거리)를 구한 뒤 비교하였다. 예를 들어 구리튜브의 최대반경이 0.6 cm(R) 일 때 각 지점의 반경(r)을 나눈 값(r/R)을 x축에 대입하고 축거리가 1 cm 일 때와 30 cm 일 때의 r/R 에 대한 온도와 축방향속도, 반경방향속도를 각각 비교하였다. 온도비교의 경우 r/R 이 1일 때 벽이 시작되는 지점이며 벽에서의 온도를 비교하기 위해 r/R 이 1이상인 지점은 벽의 온도이며 축방향속도와 반경방향속도의 경우 벽에서의 속도가 없기 때문에 벽이 시작되는 지점 즉 r/R 이 1까지만 값을 구해 비교하였다.

전체적으로 구리튜브의 내경이 0.9 cm 일 때의 그래프와 비슷한 그래프를 나타냈지만 축거리가 1 cm 와 30 cm 모두 내경이 커질수록 각 지점에서의 온도

가 더 낮게 나타나는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 5). 축방향속도 또한 같은 축거리에서 구리튜브의 내경이 증가할수록 축방향속도가 작아지는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6). 반경방향속도는 축거리가 1 cm 일 때 구리튜브의 내경이 작을수록 기체수소가 벽에서 중앙 쪽으로 더 많이 모이는 것을 확인할 수 있었으며 축거리가 30 cm 일 때는 구리튜브의 내경에 관계없이 기체수소가 벽에서 중앙 쪽으로 거의 이동하지 않는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 7).

3.3 기체수소의 유량 변화에 따른 수치모사 결과

구리튜브의 내경을 0.9 cm로 동일하게 하고 기체수소의 유량을 3 g/h와 12 g/h로 변경시켰을 때 변화를 확인하였다.

구리튜브의 내경이 같지만 3.2절 그래프와 비교를 쉽게 하기위해 r/R 을 구한 뒤 x축에 대입하여 비교를 하였다. 위 그래프와 같이 온도비교의 경우 r/R 이 1일 때 벽이 시작되는 지점이며 벽에서의 온도를 비교하기 위해 r/R 이 1이상인 지점은 벽의 온도이며 축방향속도와 반경방향속도의 경우 벽에서의 속도가 없기 때문에 벽이 시작되는 지점 즉 r/R 이 1까지만 값을 구해 비교하였다.

전체적으로 3.2절과 비슷한 그래프를 나타냈지만 축거리가 1 cm와 30 cm 모두에서 기체수소의 유량

이 증가할수록 각 지점에서의 온도가 더 높은 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 8). 축방향속도 또한 같은 축거리에서 기체수소의 유량이 증가할수록 축방향속도가 큰 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다

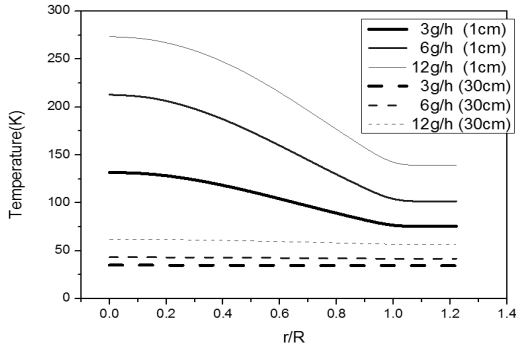


Fig. 8 Comparison of gas temperature profiles for different gas flow rates at the axial distances of 1 and 30cm

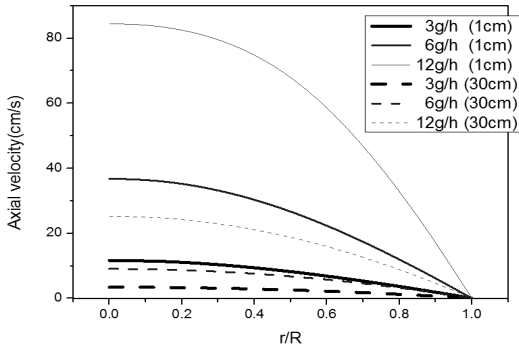


Fig. 9 Comparison of axial gas velocity profiles for different gas flow rates at the axial distances of 1 and 30cm

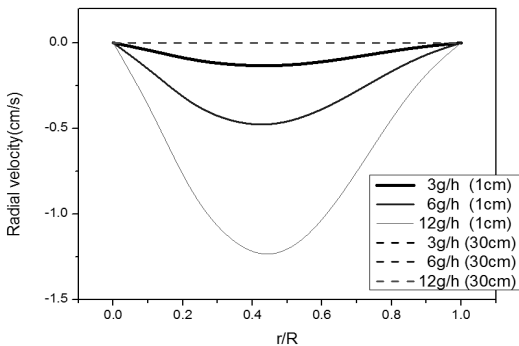


Fig. 10 Comparison of radial gas velocity profiles for different gas flow rates at the axial distances of 1 and 30cm

(Fig. 9). 반경방향속도는 축거리가 1 cm 일 때 기체수소의 유량이 커질수록 기체수소가 벽에서 중앙 쪽으로 더 많이 모이는 것을 확인 할 수 있었으며 축거리가 30 cm 일 때는 기체수소의 유량에 관계없이 기체수소가 벽에서 중앙 쪽으로 거의 이동하지 않는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 10).

4. 결 론

수소에너지는 미래 자동차산업 및 우주개발에 필수적으로 사용될 것으로 예상되며 화석연료 등의 무분별한 사용으로 인한 고갈과 환경적인 오염 등의 문제를 해결하기 위해 향후 대체에너지로의 적용 등 미래대체 에너지로 꾸준한 관심을 받고 있다. 수소의 다양한 저장방법 중에서 액화수소 저장방법이 다른 방법보다 효율 및 비용적인 측면에서 매우 우수하기 때문에 실제로 적용될 수 있도록 효율적인 수소액화 및 액체수소 저장방법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 전산유체프로그램을 사용하여 구리튜브의 내경과 들어오는 기체수소의 유량을 달리 하여 열전달에 의한 기체수소의 냉각을 통해 다양한 축거리 및 반경거리에 따른 수소의 온도변화 및 기체유속변화를 비교하였다. 그 결과 구리튜브의 내경이 커질수록 각 지점에서 낮은 온도와 느린 축방향속도를 확인하였고 상대적으로 액화를 위한 냉각이 더 잘되는 것으로 확인되었다. 또한 기체수소의 유량이 증가할수록 각 지점에서의 높은 온도 및 빠른 축방향속도를 확인할 수 있었고 상대적으로 액화를 위한 냉각이 덜 되는 것으로 확인되었다. 또한 축거리가 입구와 가까울 때는 외부와 온도차이가 커서 열전달에 의해 빠르게 냉각 또는 속도변화가 일어나지만 축거리가 커질수록 외부와의 온도차이가 작아지면서 온도와 속도변화가 매우 작게 일어나는 것을 확인할 수 있다.

전산모사프로그램을 이용한 본문의 분석 자료를

이용해 추후 실제 공정 시스템 및 수소냉각액화기의 기초자료를 설계할 때 효율적이고 경제적인 도움이 될 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2015년도 미래창조과학부재원으로 신기술융합형성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임. 강원대학교 공동실험실습관기기를 이용하여 분석을 수행하였음.

References

1. S. M. Acoves, F. Espinosa-Loza, Elias Ledesma-Orozco, T. O. Ross, A. H. Weisberg, T. C. Brunner, and O. Kircher, "High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 1219-1226.
2. G. Petitpas, S. M. Aceves, and M. J. Matthews, "Para-H₂ to ortho-H₂ conversion in a full-scale automotive cryogenic pressurized hydrogen storage up to 345 bar", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, 2014, pp. 6533-6547.
3. T. Das, S. C. Kweon, J. G. Chol, S. Y. Kim, and I. H. Oh, "Spin conversion of hydrogen over LaFeO₃/Al₂O₃ catalysts at low temperature: Synthesis, characterization and activity", *International Journal of the Hydrogen Energy*, Vol. 40, 2015, pp. 383-391.
4. J. H. Baik, S. W. Karng, H. M. Kang, N. Garceau, S. Y. Kim, and I. H. Oh, "Design and Operation of a small-scale hydrogen liquefier", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 26, No. 2, pp. 105-113.
5. R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, and E. W. Lemmin, "Thermodynamic properties of cryogenic fluids", Plenum Press, New York, 1997.
6. S. Ubaid, J. Xiao, R. Zacharia, R. Chahine, and P. Benard, "Effect of para-ortho conversion on hydrogen storage system performance", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, 2014, pp. 11651-11660.
7. C. J. Geankoplis, "Transport Processes and Separation Process Principles", 4th, "Pearson education international", U.S.A, 2003, pp. 193-209.