Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 237~242
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.237

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

수소충전소용 프리쿨러를 위한 수소가스 냉각에 관한 연구

이경한 · 구경모 · 유철휘 · 황갑진†

호서대학교 일반대학원 그린에너지공학과

Study on Cooling of Hydrogen Gas for the Pre-Cooler in the Hydrogen Refueling Station

KYUNG-HAN LEE, KYUNG-MO KOO, CHEOL-HWI RYU, GAB-JIN HWANG †

Department of Green Energy Engineering, Graduate School, Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea

† Corresponding author : gjhwang@hoseo.edu

Received 29 May, 2019
Revised 19 June, 2019
Accepted 30 June, 2019

Abstract >> In the hydrogen refueling station (HRS), it is need the pre-cooling system (PCS) to limit the inside temperature (85℃) of the onboard thank (700 bar) and to charge the hydrogen at short time (within 3 minutes) to fuel cell electric vehicle (FCEV). From those safety reasons, the temperature of hydrogen gas must be controled −33℃ to −40℃ in PCS. The cooling test of the gaseous (N_2, He, H_2) was carried out using heat exchanger (pre-cooler) by indirect cooling and direct cooling method. It was confirmed that the temperature of hydrogen gas had below −40℃ at below −75℃ of chiller temperature in direct cooling.

Key words : Hydrogen refueling station(수소충전소), Hydrogen(수소), Pre-cooling system(예냉장치), Pre-cooler(열교환기), Cooling temperature(냉각 온도)

1. 서 론

수소는 에너지 담체로 사용이 가능하며, 화석연료 사용에 의한 CO_2가스와 같은 온실가스에 의한 범지구적인 환경문제를 해결하기 위한 대책의 하나로 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 수소는 실온에서 다른 연료들 보다 높은 에너지 함량(예: 휘발유 44 MJ/kg, 수소 118 MJ/kg)을 가지고 있다[3]. 따라서 수소의 이용은 화석연료의 급속한 고갈과 이로 이한 유가변동에 따른 에너지 안보의 해결과 화석연료를 대체할 수 있다[4].

미래 저탄소 에너지 시스템에서의 에너지 저장은 전력 수요에 유연하지 않거나 간헐적인 공급의 균형을 이루기 위한 중추적인 역할을 담당할 것이며, 수소와 같이 화학결합에 의한 재생에너지의 저장은 재생에너지에 의해 생성된 전기를 화학에너지로 전환할 수 있고, 높은 에너지밀도, 자원의 풍부, 장기간 저장 가능, 저가격과 같은 특징을 가지기 때문에 각광을 받고 있다[3].

수소는 소비 과정에서 온실가스 배출 없이 부산물로 순수한 물만을 배출하고, 에너지 효율이 높고, 재생에너지 등을 수소에너지로 전환이 용이하다는 특

2019 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

징으로 인해 전 세계적으로 수소를 에너지 기반으로 하는 수소경제 체제로의 이행을 추진하고 있다[4].

우리나라의 경우 2016년까지 17개소의 수소충전소(hydrogen refueling station, HRS)를 건설하였고, 운영이 정지된 곳을 제외하면 현재 약 11개소가 운영되고 있다[5]. 또한 2019년 산업통상자원부의 수소경제 활성화 로드맵에 따르면 Table 1에 나타낸 바와 2022년 수소충전소 310개소를 설치할 계획이다[6].

HRS는 연료전지 전기자동차(fuel cell electric vehicle, FCEV)와 수소 내연기관 자동차(hydrogen internal combustion engine vehicle, HICEV)와 같은 수소발전 자동차의 구동을 위해 연료를 공급하는데 필요한 수소 인프라 기반시설에서 가장 중요한 시설 중 하나이다[4].

HRS에서 FCEV의 700 bar 탱크에 수소를 낮은 압력에서 700 bar까지 3분 이내로 빠르게 충전할 때 탱크 내부 온도는 빠른 압축으로 인해 상승하게 되고 탱크 재질의 기계적 성질에 영향을 미치게 된다[7]. 이러한 이유로 인해 탱크 내부에서 허용되는 최대 온도는 85℃ (358 K)로 국제표준과 규정에 설정되어 있다[7,8]. Society of Automotive Engineers (SAE) J2601[8]의 가이드라인에 따르면 그 이유는 다음과 같다. 700 bar의 수소저장 탱크를 탑재한 FCEV에 짧은 충전시간에 수소연료를 공급하기 위해서는 HRS와 탑재 탱크 사이에 높은 압력 차이를 필요로 하며, 수소연료를 공급하는 과정에서 열이 발생하게 된다. 열 발생의 원인은 음의 값을 갖는 수소의 Joule-Thomson (JT)효과(25℃, 900 bar에서 약 −0.05 K/bar, 1 bar에서 약 −0.03 K/bar)에 의해 생성되는 탱크 내부에서의 압축열이다. 따라서 수소저장 탱크의 복합 라이너 재료의 안정성을 보장하기 위해 탑재용 탱크 내부의 최대 온도는 85℃ (358 K)로 제한된다. 그러므로 3분 이내로 수소연료를 가득 충전하기 위해서는 충전 전에 수소를 −33℃ ~ −40℃로 냉각해야 하며, HRS의 버퍼 탱크에 저장된 수소를 FCEV의 수소탱크에 충전하기 위해서는 수소 냉각을 위한 Fig. 1에 나타낸 예냉시스템(pre-cooling system, PCS)이 필요하다[7-12].

최근, 가스의 초기 온도와 압력, 최종 온도와 압력, 수소유량, PCS에 사용되는 열교환기의 열전달 계수, 냉각 엔탈피 등의 변수를 이용한 PCS 시뮬레이션 연구가 많이 진행되고 있다[7,10-15].

본 연구에서는 PCS를 모사하여 직접 냉각과 간접 냉각 방식에 의한 가스의 냉각 온도를 측정하여 비교 평가하였다.

Table 1. Construction plan of hydrogen refueling station in South Korea

	2018	2022	2040
Fuel cell electric vehicle (FCEV)	1,800	81,000	6,200,000
Hydrogen refueling station (HRS)	14	310	1,200

2. 실 험

가스의 냉각 실험을 위해 Fig. 2에 나타낸 시판의 열교환기를 사용하였다. 열교환기의 전열면적은 0.324 m^2이고 열량은 34.5 kW로 설계되었다.

Fig. 3은 간접 냉각 실험장치를 나타낸다.

가스의 간접 냉각 실험은 다음과 같이 진행하였다.

작동유체를 정량펌프에 의해 5-110 mL/min의 속도로 칠러(chiller)에 공급하였다. 칠러의 온도는 −75℃로 하였다. 작동유체의 냉각을 위해 내경 7 mm의 동관을 11회 동글게 말아 체적이 420.8 cm^3가 되도록

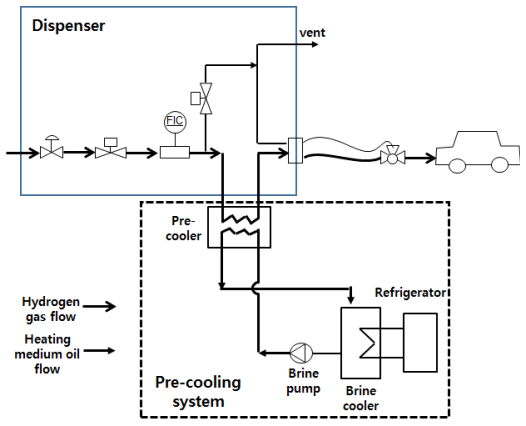

Fig. 1. Concept of the pre-cooling system in HRS

하여 칠러 내부에 설치하였다. 칠러 내부를 통과한 작동유체는 열교환기의 한 쪽 입구로 흘러 들어가 다른 쪽 출구로 나오도록 하였다. 작동유체가 칠러에서 열교환기로 흘러가는 동안 온도 변화가 생기지 않도록 보냉하였다. N_2와 He가스를 열교환기로 1 L/min의 속도로 공급하고 열교환기 출구에서의 온도를 측정하였다.

냉매와 작동유체는 지구온난화 계수 등을 고려하여 각각 R-404a와 모릭스오일 사의 neo silicone fluid (NSF) M-2를 사용하였다.

Fig. 4는 직접 냉각 실험장치를 나타낸다.

가스의 직접 냉각 실험은 다음과 같이 진행하였다. 열교환기를 칠러 내부에 직접 설치하고, N_2, H_2, He 가스를 열교환기로 0.5-2.0 L/min의 속도로 공급하면서 열교환기 출구에서의 온도를 측정하였다. 칠러의 온도는 −65℃ ~ −85℃로 하였다. 냉매는 R-404a를 사용하였다.

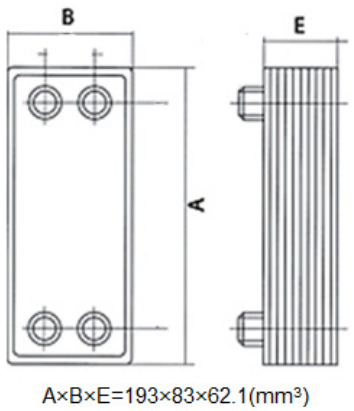

Fig. 2. Size of the heat exchanger

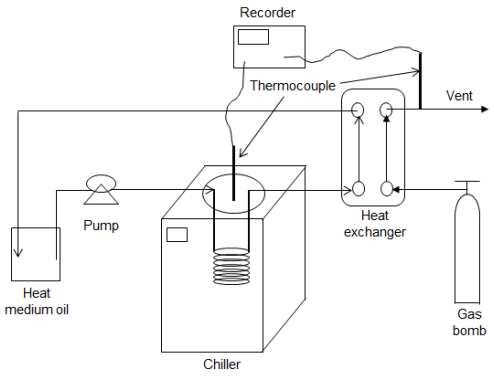

Fig. 3. Experimental apparatus for indirect cooling of the gases

3. 결과 및 고찰

Table 2는 간접 냉각에 의해 −75℃의 칠러 온도에서 측정한 작동유체의 유량과 N_2와 He가스의 냉각 온도를 나타낸다.

N_2와 He가스의 공급 유량은 1 L/min이었고, −75℃의 칠러 온도에서 작동유체의 온도는 유량에 따라 −14℃ ~ −53℃를 보였다.

Table 2에서 보여주는 바와 같이, N_2와 He가스의

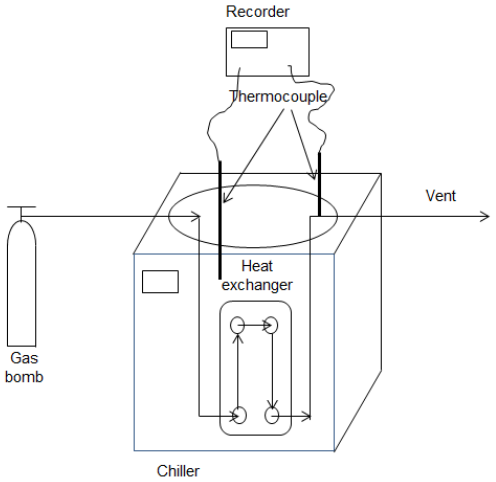

Fig. 4. Experimental apparatus for direct cooling of the gases

Table 2. Relationship between the flow rate of heat medium oil and the cooling temperature of N_2 and He gas obtained by indirect cooling

Flow rate of heat medium oil (mL/min)	Cooling temperature	
	N_2 (1 L/min)	He (1 L/min)
5	-1.8	-0.8
10	-3.1	-1.2
20	-5.6	-3.3
40	-8.3	-6.2
70	-10.6	-11
110	-11.7	-14

냉각 온도는 작동유체 유량의 증가와 함께 감소하는 경향을 보였으며, 최저 냉각 온도는 110 mL/min의 작동유체 유량에서 N_2가 −11.7℃, He이 −14℃를 보였다.

간접 냉각에 의한 가스의 냉각 온도는 목표로 하는 −40℃에 도달하지 못하였다. 이 이유로는 열교환기를 통한 작동유체와 가스의 온도 사이에서 열교환이 제대로 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.

Table 3은 직접 냉각에 의해 측정한 칠러 온도와 N_2와 He 가스의 유량에 따른 냉각 온도를 나타낸다.

Table 3에서 보여주는 바와 같이, 일정 유량에서의 N_2와 He가스의 냉각 온도는 칠러의 냉각 온도가 감소함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 또한 일정 칠러 온도에서의 N_2와 He가스의 냉각 온도는 유량의 증가와 함께 약간 증가하는 경향을 보였다.

N_2가스의 경우, 유량에 따라 −65℃의 칠러 온도에서 −55.1℃ ~ −57.6℃, −75℃의 칠러 온도에서 −66.7℃ ~ −65.3℃, −85℃의 칠러 온도에서 −77.4℃ ~ −75.5℃의 냉각 온도를 보였다.

He가스의 경우, 유량에 따라 −65℃의 칠러 온도에서 −47.3℃ ~ −51.6℃, −75℃의 칠러 온도에서 −68.0℃ ~ −62.9℃, −85℃의 칠러 온도에서 −77.5℃ ~ −75.7℃의 냉각 온도를 보였다.

Table 2와 Table 3의 결과를 비교하면, 직접 냉각에 의한 가스의 냉각 온도가 간접 냉각에 의한 가스의 냉각 온도보다 낮음을 알 수 있다. 이 결과로부터 가스의 냉각을 위해서는 직접 냉각이 간접 냉각보다 유리하다고 사료된다.

Table 3. Relationship between the temperature of chiller and the cooling temperature of N_2 and He gas obtained by direct cooling

Cooling temperature							
Gas		N_2			He		
Chiller temp. (℃)		-65	-75	-85	-65	-75	-85
Flow rate of gas (L/min)	0.5	-57.6	-66.7	-77.4	-47.3	-68.0	-77.5
	1.0	-57.6	-66.4	-76.8	-49.0	-66.4	-76.8
	1.5	-57.0	-65.5	-76.8	-54.5	-64.6	-76.0
	2.0	-55.1	-65.3	-75.5	-51.6	-62.9	-75.7

각 유량에 따른 N_2와 He가스의 냉각 온도는 −65℃ 이하의 칠러 온도에서 −40℃ 이하의 값을 보였다. 이 결과로부터 직접 냉각에 의한 H_2가스의 냉각 온도는 목표로 하는 −40℃에 도달할 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 직접 냉각에 의해 칠러 온도 변화에 따른 H_2가스의 냉각 실험을 진행하였다.

Fig. 5는 직접 냉각에 의해 측정한 칠러 온도와 H_2가스의 유량에 따른 냉각 온도를 나타낸다.

Fig. 5에서 보여주는 바와 같이, H_2가스의 냉각온도는 일정한 칠러의 냉각 온도에서 유량의 증가와 함께 약간 증가하지만, 크게 변하지는 않았다. 각 유량에서 H_2가스의 냉각 온도는 −65℃의 칠러 온도에서 약 −27℃ ~ −26.2℃를, −75℃의 칠러 온도에서 약 −40.4~40.1℃를, −85℃의 칠러 온도에서 약 −53℃를 보였다.

각 유량에 따른 H_2가스의 냉각 온도는 −75℃ 이하의 칠러 온도에서 −40℃ 이하의 값을 보였다.

칠러 온도에 따른 H_2가스의 냉각 실험으로부터 H_2가스의 냉각 온도는 직접 냉각에 의해 목표로 하는 −40℃에 도달한다는 것을 확인할 수 있었다.

이상의 결과로부터, HRS에서 FCEV의 700 bar 탱크에 3분 이내로 수소연료를 가득 충전하기 위해 필요로 하는 PCS에서의 냉각 온도인 −33℃ ~ −40℃를 달성하기 위해서는 간접 냉각보다는 직접 냉각이 유

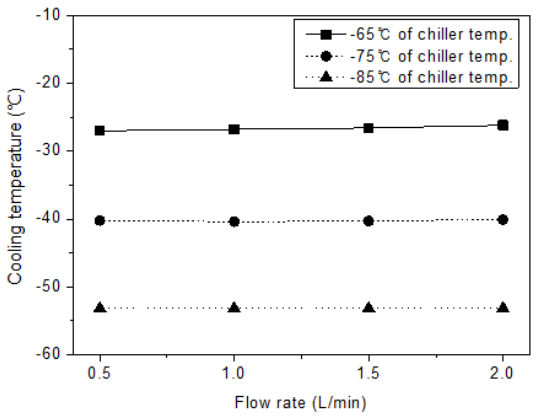

Fig. 5. Relationship between the temperature of chiller and the cooling temperature of H_2 gas obtained by direct cooling

리하다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

HRS에서 FCEV의 700 bar 탱크에 수소를 낮은 압력에서 700 bar까지 3분 이내로 빠르게 충전하고, 탑재용 탱크의 내부 온도가 85℃ 이상으로 상승하는 것을 방지하기 위해서는 충전 전에 수소를 −33 ~ −40℃로 냉각할 수 있는 PCS가 필요하다. 이 연구에서는 PCS를 모사하여 가스의 직접 냉각과 간접 냉각에 대해 비교 평가하였으며, 가스 유량에 따른 수소 냉각 온도를 측정하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 간접 냉각에 의해 작동유체의 유량 변화에 따른 N_2와 He가스의 냉각 온도를 측정한 결과, 최저 냉각 온도는 110 mL/min의 작동유체 유량에서 N_2가스는 −11.7℃, He가스는 −14℃를 보였다.

2) 직접 냉각에 의해 칠러 온도 변화와 N_2, He, H_2 가스의 유량에 따른 냉각 온도를 측정한 결과, 각 유량에 따른 가스의 냉각 온도는 −65℃ 이하의 칠러 온도에서 −40℃ 이하의 값을 보였다.

3) 칠러 온도에 따른 H_2가스의 냉각 실험으로부터 H_2가스의 냉각 온도는 직접 냉각에 의해 목표로 하는 −40℃에 도달한다는 것을 확인할 수 있었다.

4) PCS에서의 수소가스 냉각 온도인 −33℃ ~ −40℃를 달성하기 위해서는 간접 냉각보다는 직접 냉각이 유리하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부와 한국에너지기술평가원이 지원하는 에너지기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 재원지원에 감사드립니다(No. 20163030041250).

References

1. G. J. Hwang, H. S. Choi, A. S. Kang, J. W. Kim, and K. Onuki, “Thermochemical water-splitting IS(iodine-sulfur) process for hydrogen production”, J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 13, No. 6, 2002, pp. 600-605.
2. G. J. Hwang, K. S. Kang, H. J. Han, and J. W. Kim, “Technology trend for water electrolysis hydrogen production by the patent analysis”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 18, No. 1, 2007, pp. 95-108.
3. G. J. Hwang and H. S. Choi, “Hydrogen production systems through water electrolysis”, Membrane J., Vol. 27, No. 6, 2017, pp. 477-786, doi: https://doi.org/10.14579/MEMBRANE_JOURNAL.2017.27.6.477.
4. J. AIazemi and J. Andrews, “Automotive hydrogen fueling satations: An international review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 48, 2015, pp. 483-499, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.085.
5. T. H. Lee, B. W. Kang, E. W. Lee, C. J. Bae, and H. S. Jin, “The study to find causes for measuring differences of hydrogen fillings in hydrogen refueling station”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 32-40, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.32.
6. Press release, “Road map of the hydrogen economy vitalization”, Ministry of Trade, Industry and Energy of South Korea, Korea, 2019. 1. 17. Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=161262&bbs_cd_n=81&currentPage=531&search_key_n=title_v&cate_n=&dept_v=&search_val_v=.
7. D. Melideo, D. Baraldi, M. C. Galassi, R. O. Vebolla, B. A. Iborra, and P. Moretto, “CFD model performance benchmark of fast filling simulations of hydrogen thanks with pre-cooling”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 39, No. 9, 2014, pp. 4389-4395, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.196.
8. Society of Atomotive Engineers (SAE)-J2601, “Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles”, Surface Vehicle Standard, USA, 2014. Retrieved from https://www.sae.org/standards/content/j2601_201407/.
9. S. Pique, B. Weinberger, V. De-Dianous, and B. Debray, “Comparative study of regulations, codes and standard and practices on hydrogen fuelling station”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 11, 2017, pp. 7429-7439, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.158.
10. A. Elgowainy, K. Reddi, D. Y. Lee, N. Rustagi, and E. Gupta, “Techno-economic and thermodynamic analysis of pre-cooling systems at gaseous hydrogen refueling stations”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 49, 2017, pp. 29067-29079, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.087.
11. E. Talpacci, M. Reuβ, T. Grube, P. Cilibrizzi, R. Gunnella, M. Robinius, and D. Stolten, “Effect of cascade storage system topology on the cooling energy consumption in fueling stations for hydrogen vehicles”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 12, 2018, pp. 6256-6265, doi: https://doi.org/

10.1016/j.ijhydene.2018.02.030.

12. A. Bauer, T. Mayer, M. Semmel, M. A. G. Morales, and J. Wind, "Energetic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous stored hydrogen", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 13, 2019, pp. 6795-6812, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.087.
13. J. Xiao, X. Wang, P. Benard, and R. Chahine, "Determining hydrogen pre-cooling temperature from refueling parameters", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 41, No. 36, 2016, pp. 16316-16321, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.084.
14. J. Xiao, J. Cheng, X. Wang, P. Benard, and R. Chahine, "Final hydrogen temperature and mass estimated from refueling parameters", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 49, 2018, pp. 22409-22418, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.131.
15. T. Kuroki, N. Sakoda, K. Shinzato, M. Monde, and Y. Tanaka, "Prediction of transient temperature of hydrogen flowing from pre-cooler of refueling station to inlet of vehicle tank", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 3, 2018, pp. 1846-1854, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.033.