

수소저장합금을 이용하는 수소공급시스템의 운전 방법 최적화

김병준*, 성해정**, 이영덕***[†], 이상민***, 조주형***, 안국영***

*포스코파워(주), **과학기술연합대학원대학교 대학원, ***한국기계연구원

Operating Strategy Optimization of Metal Hydride based Hydrogen Supply System

BYUNGJUN KIM*, HAEJUNG SUNG**, YOUNGDUK LEE***[†], SANGMIN LEE***,
JUHYEONG CHO***, KOOKYOUNG AHN***

*POSCO Power Inc.

**Graduate School, University of Science and Technology

***Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

ABSTRACT

Characteristics of a commercial metal hydride (MH) hydrogen supply system have been investigated and an operating strategy was developed based on the experimental data. As a prior step, charging/discharging capacity, thermal properties such as heat capacity, heat of reaction of MH system were experimentally measured. And then P-C-T data for various operating conditions were collected and a correlation between P, C and T predicting the behavior of MH was derived.

Based on the basic experimental data, an operating strategy of MH system was developed, in which the hot water temperature supplied into the water jacket of MH was controlled depending on the pressure of MH, thereby the pressure of MH could be maintained at a suitable range. By adjusting the temperature of hot water from 40°C to 60°C, the maximum discharging capacity of hydrogen could be increased by 4.7%, and consequently more stable hydrogen supply and longer operation time of fuel cell system could be achieved.

KEY WORDS : Metal hydride(금속 수소화물), Operating strategy(운전 전략), Temperature control(온도 제어), Fuel cell system(연료전지 시스템)

Nomenclature

C_p : heat capacity [kJ/kg·K]

H_2 : hydrogen

ΔH : heat of reaction [kJ/mol·H₂]

H/M: mass ratio of hydrogen and metal hydride

M : Inter-metallic compound

MH_x or MH : metal hydride

m : mass [g]

P : gauge pressure [bar]

Q : thermal energy

R : gas constant [8.3145J/mol·K]

[†]Corresponding author : ydlee@kimm.re.kr

[접수일 : 2011.4.24 수정일 : 2011.9.15 게재확정일 : 2011.10.21]

T : temperature [K]

ΔT : temperature difference [K]

Subscripts

0 : initial state

a : aluminum canister

eq : equilibrium state

H : high

L : low

s : stainless steel vessel

w : water

1. 서 론

수소는 수소 경제 시대를 대비하는 차세대 에너지원으로서 제조, 저장, 이용 등의 각 분야에서 다양한 연구가 폭넓게 진행되고 있다¹⁻³⁾.

수소는 단위 질량당 에너지 밀도가 높고 여타 탄화수소 연료에 비하여 단위 질량당 발열량이 높은 반면, 밀도가 매우 작기 때문에 단위 부피 당 에너지 밀도는 매우 작은 단점이 있다⁴⁾. 또한 기체 중 가장 큰 열전도율을 가지고 있고, 확산이 빠르며, 점화 에너지가 작아 점화가 쉽게 일어날 수 있기 때문에 수소 저장 시에는 저장 효율과 안전성에 대한 주의가 필요하다⁵⁾. 이러한 필요성에 의해 수소를 안전하고 효율적으로 저장하기 위한 다양한 연구가 많이 진행되어 왔다. 대표적인 수소저장방법으로는 고압가스상태로 수소를 저장하는 방법, 액체 상태로 저장하는 방법, 금속 수소화물 상태로 저장하는 방법이 있다⁶⁻⁹⁾.

압축 수소는 고압(700bar)의 가스 상태로 저장하는 방법으로 질량 밀도는 우수하지만 폭발과 누설의 위험으로 인해 안전성을 확보해야 하는 문제가 있다. 액체 수소는 끓는점 이하의 온도에서 수소를 액체 상태로 저장하기 때문에 질량 및 부피 밀도는 우수하지만 수소를 액화시키기 위한 제조 비용 및 액화된 수소의 기화 방지를 위한 단열 및 유지비용이 추가적으로 들어간다는 단점이 있다.

금속 수소화물 형태로 수소를 저장하는 수소저

장합금은 상대적으로 낮은 압력(상압부터 10기압 정도)과 온도조건에서 고체 상태로 수소를 저장하는 방식으로 수소저장합금의 무게가 무겁기 때문에 수소저장의 질량 밀도가 낮다는 단점이 있다. 하지만 부피 밀도 및 안전성이 다른 저장 방법에 비해 우수하기 때문에 군사용 등의 특수목적 분야에서는 각광 받는 수소저장방법이다¹⁰⁾.

이러한 장점이 있는 금속 수소화물이 수소저장합금으로 쓰이기 위해서 높은 수소 저장 능력을 가지고 있어야 한다. 그리고 수소 저장과 방출이 낮은 온도와 압력에서 용이해야 하며, 낮은 반응 에너지를 가지는 것이 좋다¹⁰⁻¹¹⁾.

수소가 금속 또는 금속 수소화물에 흡착되어 금속 수소화물로 구성될 때에는 발열 반응이 일어나며, 이는 식 (1)과 같다¹¹⁾.



수소저장합금 관련 연구는 높은 저장 밀도를 갖는 재료, 빠른 반응을 위한 열전달 최적화, 연료전지와 효율적인 시스템 통합의 세 분야로 크게 구분할 수 있다¹¹⁻¹⁵⁾.

Yang 등¹¹⁾은 실험결과와 기존연구결과를 비교하여 새로운 구조를 갖는 수소저장합금이 기존의 합금이나 화학수소화물, 흡수제보다 더 많은 수소를 저장할 수 있는 결과를 보고하였다.

Mellouli 등¹²⁾은 전산해석 연구를 통해 수소저장합금 내부의 열거동을 모사하였다. 내부에 핀을 설치한 경우가 핀이 없는 경우보다 열전달이 고르게 나타나고, 시간에 따른 온도변화도 더 빠르다는 결과를 보고하였다.

Forde 등¹³⁾은 계산을 통해 연료전지 스택에서 발생하는 열량과 수소저장합금에서 요구되는 열량을 비교하였다. 연료전지 스택에서 배출되는 열을 수소저장합금에 효율적으로 이용함으로써 시스템의 열효율과 운전 안정성을 확보할 수 있음을 보고하였다.

기존 연구에서는 수소저장합금 자체의 성능을 개선하는 연구나 수소저장합금 용기와 연료전지 스

택을 연계하여 시스템을 구성하는 연구는 비교적 활발하게 진행되었으나, 수소저장합금 자체의 운전 최적화를 위한 연구는 많이 진행되지 않았다.

본 논문에서는 수소저장합금 용기의 운전조건 변경을 통해 용기내의 압력을 조절함으로써 수소를 효율적이고 안정적으로 공급하기 위한 운전최적화 연구를 수행하였다. 수소저장합금 용기의 물 재킷에 공급되는 온수의 온도는 연료전지 냉각수의 온도범위를 고려하여 적절한 범위에서 변경하였으며, 향후 연료전지 스택과의 연계시스템 구성 시 본 논문에서 도출된 수소저장합금 용기의 운전전략을 활용할 수 있도록 하였다.

2. 실험 장치

2.1 수소저장합금 용기

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 상용 수소저장합금 용기로서 Hydrogen Component Inc에서 제작/공급되었다. 모델명은 CL-720이며, Lanthanum 계열의 $LaNi_{4.6}Mn_{0.4}$ 을 금속 수소화물로 사용하였고, 최대 720L의 수소를 저장할 수 있다¹⁶⁾. 금속 수소화물만의 무게는 4.9kg이고 외부용기는 1.6kg으로 구성되어 있다.(세부사양은 Table 1 참고)

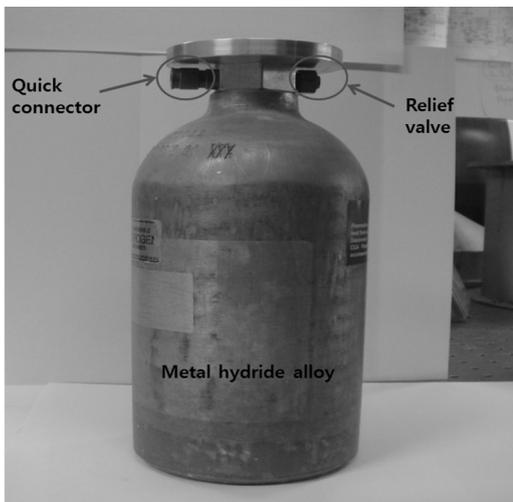


Fig. 1 Picture of commercial metal hydride canister

Table 1 Specification of commercial metal hydride

Parameter	Value
Hydrogen storage capacity	720 L
Total mass (1)+(2)	6.5 kg
(1) Aluminium Canister	1.6 kg
(2) Metal hydride	4.9 kg
Relief Pressure	23 bar

2.2 실험 장치 구성

Fig. 2에 본 실험에서 사용한 실험 장치의 구성을 나타내었다. 실험 장치는 크게 냉각수를 일정한 온도와 유량으로 공급해주는 냉각수 순환장치 부분과 배출되는 수소의 압력과 유량을 측정하는 수소배출장치 부분으로 구분된다.

냉각수의 유량은 펌프와 유량계를 이용하여 일정하게 순환시켰고, 물 재킷 입구에 설치된 열전대와 제어를 이용하여 히터의 용량을 제어함으로써 온수의 온도를 일정하게 제어하였다.

수소저장합금 외부의 물 재킷으로부터 배출되는 물은 방열기 (Radiator)를 이용하여 충분히 냉각시킨 후 다시 펌프로 공급될 수 있도록 장치를 구성하였다.

수소저장합금에서 배출되는 수소의 유량은 유량계(MFC, mass flow controller)를 통해 일정하게 제어하고 배출되는 양을 측정하였다. MFC가 안정

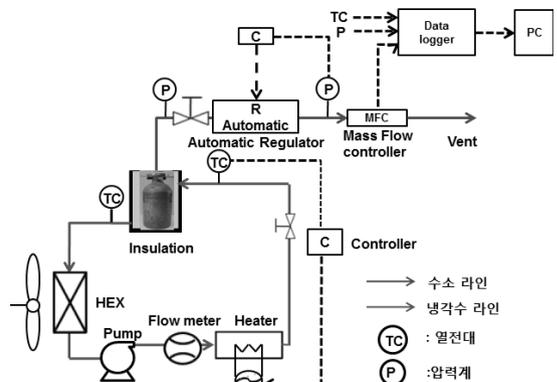


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

적으로 동작하기 위해서는 MFC 입구의 압력을 4 bar로 맞추어 주어야 하는데, 이를 위하여 자동 압력조정기(automatic pressure regulator, TESCOM 사 ER-3000 모델)를 사용하였다. 자동 압력조정기 후단의 압력을 일정하게 제어하고 수소저장합금 내부의 압력을 실시간으로 측정하기 위하여 별도의 압력센서(pressure transducer)를 설치하였다. 시스템 각부의 유체의 온도변화를 측정하기 위하여 T-type의 열전대를 설치하였고, 모든 압력과 온도 신호는 Data-logger를 이용하여 기록하였다.

3. 실험 방법

3.1 최대 충전량 및 방출량 측정

실험에 사용된 수소저장합금 용기의 최대 수소 충전량과 방출량을 측정하기 위하여 충전/방출 실험을 15회 반복 수행하였다. 수소 충전 시에는 수소가 급속에 흡착되며 발생하는 열이 외부로 잘 발산할 수 있도록 0°C의 물이 있는 수조에 담근 상태로 수행하였고, 방출 시에는 용기 내의 잔류 수소 방출을 최대화하기 위하여 80°C의 온수를 물 재킷에 지속적으로 공급하였다.

수소 충전 후와 방출 후의 수소저장합금 용기의 무게는 전자저울을 이용하여 측정하였다. 측정에 사용된 저울은 최대측정무게 21kg, 최소 측정단위 0.1g, 정확도 0.1g인 저울(AND사 GF-20K 모델)을 이용하였다.

3.2 수소저장합금 용기의 열용량 측정

수소저장합금 용기의 동적거동을 예측하기 위해서는 수소저장합금과 저장용기의 비열 값이 필요하다. 금속수소화물의 비열은 금속분말을 이용하여 정밀하게 측정할 수 있지만, 본 실험에서는 상용 수소저장합금 용기를 구매하여 사용하였기 때문에 금속분말의 채취가 현실적으로 어려운 문제로 인해 수소저장합금 용기를 분해하지 않고 비열 값을 간접적으로 계산할 수 있도록 실험을 수행하였다.

수소를 완전히 방출한 후에 수소저장합금 용기

를 일정한 온도의 온수가 공급되는 물 재킷에 장시간 넣어 수소저장합금 용기 내부까지 온도가 일정하게 되도록 한다. 그 후 상온(약 27°C)의 냉수가 들어있는 용기에 곧바로 집어넣어 냉수의 온도가 변화하지 않는 지점까지 장시간 온도변화를 측정하였다. 용기의 온도는 50°C, 60°C, 70°C의 세 조건에서 실험하였다. 냉수의 온도가 더 이상 상승하지 않고 평형상태일때 수소저장합금 용기의 온도와 냉수의 온도는 동일하다고 가정하였다. 냉수의 온도변화를 통해 냉수가 얻은 열을 계산하였고, 이를 통해 수소저장합금의 열용량을 간접적으로 계산하였다. 자세한 계산식은 식 (2)에 나타내었다. 수소저장합금 용기 내에 남아있는 미량의 수소는 전체적인 계산에 미치는 영향이 미미하다 판단하여 무시하였다.

$$\begin{aligned} & m_w \times C_{p,w} \times \Delta T_w + m_s \times C_{p,s} \times \Delta T_s \\ & = m_{al} \times C_{p,al} \times \Delta T_{s,al} + m_{MH} \times C_{p,MH} \times \Delta T_{s,MH} \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 금속 수소화물의 반응열 측정

수소저장합금에서 수소가 방출되는 과정은 흡열 과정이기 때문에 외부로부터 열을 공급해주어야 안정적으로 수소를 방출할 수 있다. 흡열과정에 필요한 반응열을 측정하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 물 재킷에 공급되는 온수의 온도와 유량을 일정하게 장시간동안 유지하였다. 공급되는 온수의 온도는 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 네 가지의 경우를 수행하였다. 장시간 동안 초기조건을 유지하였기 때문에 초기 온수의 온도와 수소저장합금의 온도가 평형이 되었다고 가정하였다. 이후 온수 공급을 중단하고 MFC를 이용하여 수소를 일정량(2 slpm)으로 방출하면서 온수의 온도변화를 측정하였다. 물의 온도변화와 수소방출량을 이용하여 수소방출에 필요한 반응열을 계산하였으며, 자세한 계산식은 식 (3)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} & m_s \times C_{p,s} \times \Delta T_s + m_w \times C_{p,w} \times \Delta T_w \\ & + m_{al} \times C_{p,al} \times \Delta T_{al} \\ & + m_{MH} \times C_{p,MH} \times \Delta T_{MH} = m_{H_{MH}} \times \Delta H \end{aligned} \quad (3)$$

m_s, m_w, m_{al} 은 각각 스테인리스 스틸(물 재킷의 재료), 물, 알루미늄(수소저장합금 용기의 재료)의 질량으로서 실제 무게를 측정하여 값을 얻었다. $C_{p,s}, C_{p,w}, C_{p,al}$ 은 각각 스테인리스 스틸, 물, 알루미늄의 비열로서 문헌을 통해 값을 얻었다. ΔT 는 수소 방출 전과 후의 온도 차를 나타내며 물 재킷의 온도는 온수의 온도와 동일하다고 가정하였다.

3.4 P-C-T 곡선 측정 및 상관식 도출

기존 문헌을 보면, 수소저장합금 용기 내부의 압력은 금속수소화물에 포함된 수소의 함량과 온도에 의해 결정된다^{17,18)}. 본 실험에서는 금속수소화물의 압력, 수소함량, 온도 사이의 상관관계를 도출하기 위하여 다양한 수소함량과 온도조건에서 평형 압력을 측정하는 실험을 수행하였다.

금속 수소화물에 포함된 수소의 함량을 결정하기 위하여 수소가 완전히 방출된 상태의 용기의 무게를 미리 측정하였다. 이후에 용기에 충전된 수소를 외부로 일정량씩 방출하면서 무게를 측정하여 미리 측정해 놓은 빈 용기의 무게를 기준으로 수소 충전량을 계산하였다. 용기 내의 평형 압력은 일정한 온도의 온수를 물 재킷에 장시간 공급한 후 충분한 시간이 경과하여 압력의 변화가 없는 상태에서 측정하였다. 수소를 일정량씩 외부로 방출하면서 용기에서의 수소 함량과 평형 압력 측정을 반복함으로써 P-C-T 곡선을 도출하였다.

수소저장합금의 압력-조성-온도 간의 상관관계를 나타내는 식은 기존의 문헌¹⁹⁾에서 제시된 식을 이용하였으며, 실험값과 상관식이 일치되도록 계수를 조정하였다. 상관식의 형태는 식 (4)와 같다.

$$\ln \frac{P_{eq}}{P_0} = a - \frac{b}{T} + c \times \tan(d \times \pi \times (\frac{H}{M} - e)) + f \quad (4)$$

3.5 공급수 온도조건에 따른 수소 방출량 측정

수소저장합금에 공급되는 온수의 온도가 금속수소화물의 평형압력과 수소 방출특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 온수의 온도를 40℃, 50℃, 6

0℃로 변경하면서 금속수소화물 용기내의 압력과 시간에 따른 수소 방출량을 측정하였다. 방출하는 수소의 유량은 2slpm으로 설정하였는데, 이는 250W의 출력을 가지는 연료전지 스택에서 연료 이용률을 85%로 가정하였을 때 필요한 수소의 공급량이다.

실험 장치는 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 전기히터와 상용제어기를 이용하여 온수의 온도를 일정하게 조절하고, 유량계와 펌프를 이용하여 온수의 유량을 조절하였다. MFC를 이용하여 방출되는 수소의 유량을 제어하였고 MFC에서 나오는 신호를 데이터 로거를 이용하여 저장하여 수소가 방출된 시간과 유량을 간접적으로 측정하였다.

3.6 공급수 온도변경에 따른 수소저장합금 용기의 운전특성

수소저장합금에 공급되는 온수의 온도를 초기에는 40℃로 유지하다가 일정량의 수소가 방출되어 압력이 떨어지면 온수의 온도를 50℃로 올려 수소저장합금의 압력을 증가시킨다. 다시 일정량의 수소가 방출되어 수소저장합금의 압력이 떨어지면 온수의 온도를 60℃로 올려서 수소저장합금의 압력을 증가시킴으로써 수소가 안정적으로 공급될 수 있도록 하였다. 방출되는 수소의 유량은 2slpm으로 설정하였고, 수소저장합금 용기 내부의 압력이 6bar 이하로 떨어지지 않도록 온수의 온도를 제어하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 수소 충전 및 방출

수소저장합금 용기에 반복적으로 수소를 충전하고 방출한 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다. 총 15회 반복실험을 수행하였으며, 평균적으로 1.33wt%의 수소가 충전되었고, 방출 후에 0.061wt%의 수소가 금속 수소화물 용기 내에 잔류함을 확인하였다. 두 값을 비교하면 수소저장합금용기를 통해 연료전지 시스템으로 공급될 수 있는 수소의 양은 1.269wt% 정도임을 확인할 수 있었다.

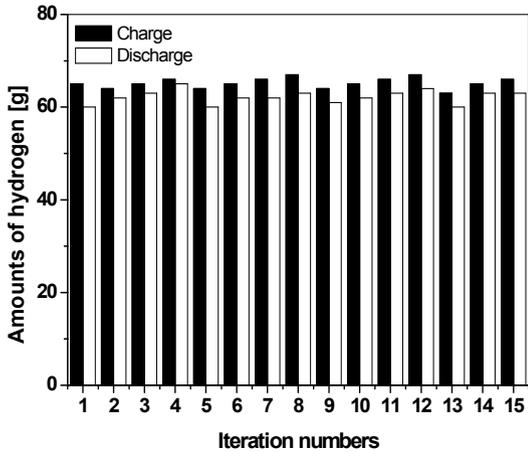


Fig. 3 The amount of hydrogen charge/discharge from metal hydride alloy

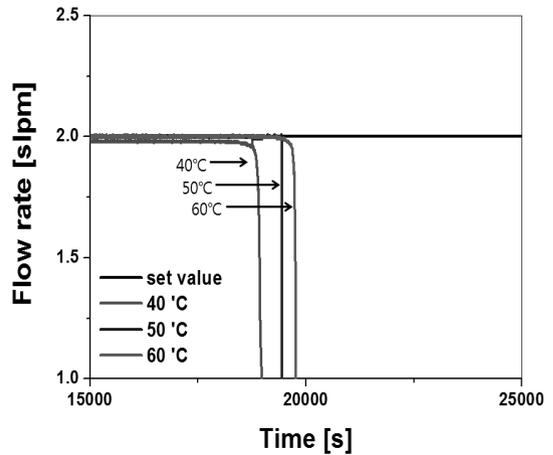


Fig. 5 Hydrogen discharging capacity measurement under various temperature conditions

4.2 수소저장합금 용기의 열적 특성값

금속수소화물의 비열을 실험을 통해 간접적으로 측정하였으며 50°C에서는 1.140kJ/kg·K, 70°C에서는 1.277kJ/kg·K를 나타내었으며, 평균 1.193kJ/kg·K를 나타내었다.

금속수소화물에서 수소가 방출되는 과정은 흡열 과정으로 외부에서 열을 공급해주어야 하는데, 이때의 반응열은 평균 42.432kJ/mol·H₂로 계산되었다.

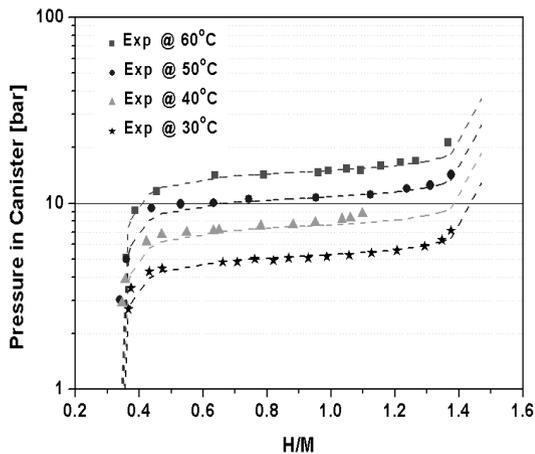


Fig. 4 Curve fitting results for measured P-C-T data profiles

4.3 P-C-T 곡선 및 상관식 도출

금속수소화물의 P-C-T 곡선을 실험을 통해 측정하였다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 대략 0.4 ~ 1.3 wt% 구간에서 Plateau 영역이 관찰되었다. 실험에서 측정된 값을 바탕으로 식 (4)의 상관식에서 사용하는 계수 값을 조정하여 실험값과 상관식이 잘 부합하도록 하였으며, 이때의 계수 값을 Table 2에 나타내었다.

측정결과 0.4wt% 이하의 영역에서는 수소저장합금 용기 내의 압력이 급격하게 감소하였다. 0.35wt% 이하에서는 압력이 너무 낮아 MFC를 이용하여 연료전지에 수소를 공급할 수 없을 것으로 판단되었다. 압력이 급격하게 감소하는 0.4wt%에서부터 0.35wt%의 영역에서는 수소저장합금의 운전조건

Table 2 Coefficient for correlation of P-C-T profiles

Coefficient	Value
a	13.62
b	3500
c	-0.08
d	-48.4685
e	0.9137
f	-0.4504

Table 3 Hydrogen discharging time under various temperature conditions

	liter	%
40℃	633.4	100.0%
50℃	658.6	104.0%
60℃	663.4	104.7%

을 적절하게 변경하여 수소저장합금 용기 내부의 압력을 조절함으로써 잔류수소를 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 공급수 온도조건 별 수소 방출량

Fig. 5에 공급되는 온수의 온도를 40℃, 50℃, 60℃로 변경한 경우에 수소저장합금 용기로부터 수소를 방출한 실험결과를 나타내었다. 온수의 온도를 증가시킬수록 더 오랜 시간 동안 수소를 방출할 수 있었다. 이는 같은 양의 수소가 수소저장합금에 충전되어 있는 경우에 더 많은 수소를 꺼내어 사용할 수 있음을 의미한다. 따라서 수소저장합금으로부터 수소를 공급받는 연료전지 시스템이 더 장시간 운전될 수 있다.

온수의 온도조건 별로 수소방출시간과 이를 기준으로 계산한 수소방출량을 정리하여 Table 3에 나타내었다. 온수의 온도가 40℃인 경우와 60℃인 경우를 비교하면 수소 방출량은 4.7% 정도를 차이를 나타내었다. 이는 공급되는 온수의 온도를 높임으로써 수소저장합금에 저장되어 있는 수소를 효율적으로 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

4.5 공급수 온도 변경을 통한 수소저장합금 용기의 운전특성

온수를 40℃로 공급하다가 용기내의 압력이 6 bar 이하로 하강하게 되면 온수의 온도를 50℃로 상승시켜 용기 내의 압력을 6bar 이상으로 유지하고, 다시 용기의 압력이 하강하면 온수의 온도를 60℃로 상승시켜 용기의 압력을 상승시킨 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다.

실험결과 수소저장합금 용기 내의 압력은 온도

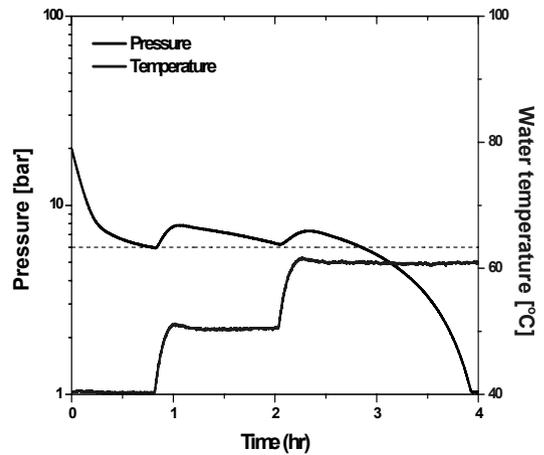


Fig. 6 Changing pressure trend of MH with changing hot water temperature

에 따라 세 가지 조건의 P-C-T 곡선 위를 이동하며 수소를 방출하였다. 40℃로만 운전한 경우에 비하여 용기내의 압력을 원하는 범위로 제어함으로써 수소를 안정적으로 공급할 수 있었다. 수소저장합금내의 수소함량이 낮은 영역에서 방출압력을 증가 시킴으로써 최대한 많은 양의 수소를 높은 압력으로 방출 할 수 있었다.

수소저장합금과 연료전지를 연계하는 시스템에서는 수소저장합금에 공급되는 온수는 연료전지 스택에서 배출되는 고온의 냉각수와 열교환을 통해 가열-공급되는 것이 일반적이다. 연료전지 스택에서 배출되는 냉각수의 온도가 일반적으로 70℃ 정도임을 고려할 때, 40~60℃ 범위에서 온도를 조절하여 수소저장합금 용기에 온수를 공급하게 되면 효율적인 시스템 운전측면에서 유리하다 판단된다.

5. 결 론

LaNi_{4.6}Mn_{0.4} 계열의 금속수소화물을 이용하는 상용 수소공급시스템을 대상으로 효과적인 운전전략에 대해 실험적 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서 사용한 상용 수소저장합금 용기는

평균 1.331wt%의 수소를 충전할 수 있으며, 잔류수소를 제외하고 평균 1.269wt%의 수소를 방출할 수 있다.

- 2) 금속수소화물의 비열은 평균 1.193kJ/kg · K이고, 수소를 방출할 때 수소저장합금 용기의 반응열은 평균 42.432kJ/mol · H₂ 인 것을 알 수 있다.
- 3) 온도와 수소 함량 비율 변화에 따른 용기 내부의 평형 압력을 측정하여 압력-조성-온도 (P-C-T)의 실험값을 도출하였고, 문헌에서 제시된 식의 계수를 조정하여 상관식을 도출하였다.
- 4) 수소저장합금 용기 내부의 수소 잔량이 적을 경우 수소저장합금 용기에 공급되는 온수의 온도를 높임으로써 수소저장합금 용기내의 압력을 상승시킬 수 있고, 60℃의 온도로 작동하는 경우 40℃로 작동하는 경우에 비하여 4.7% 정도의 수소를 더 활용할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 일반사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) B. Gim, and J. Kim, "An Analysis of the Economy of Scale for Domestic On-site Hydrogen Fueling Stations", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 16, No. 4, 2007, pp. 170-180.
- 2) T. Pregger, D. Graf, W. Krewitt, C. Sattler, M. Roeb, and S. Moller, "Prospects of solar thermal hydrogen production processes", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 4256-4267.
- 3) L. Reguera, J. Roque, J. Hernandez, and E. Reguera, "High density hydrogen storage in nanocavities: Role of the electrostatic interaction", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 12864-12869.
- 4) Schlapbach. L., and Zuttel A, "Hydrogen-storage materials for mobile applications",

Nature, Vol. 414, 2002, pp. 353-358.

- 5) J. Larminie, and A. Dicks, *Fuel Cell System Explained*. 2nd ed., Wiley.
- 6) F.L. Darkrim, P. Malbrunot, and G. P. Tartaglia, "Review of hydrogen storage by adsorption in carbon nanotubes", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, 2002, pp. 193-202.
- 7) J.B. Taylor, J.E.A. Alderson, K.M. Kalyanam, A.B. Lyle, and L.A. Phillips, "Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 11, 1986, pp. 5-22.
- 8) H. Tanaka, K. Tokoyoda, M. Matsumoto, Y. Suzuki, T. Kiyobayashi, and N. Kuriyama, "Hazard assessment of complex hydrides as hydrogen storage materials", Vol. 34, 2009, pp. 3210-3218.
- 9) S.H. Ho, and M. M. Rahman, "Three-dimensional analysis for liquid hydrogen in a cryogenic storage tank with heat pipe - pump system", Vol. 48, 2008, pp. 31-41.
- 10) B. Sakintuna, F. Lamari-Darkrim, and M. Hirscher, "Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review", Vol. 32, 2007, pp. 1121-1140.
- 11) J. Yang, A. Sudik, C. Wolverton, and D.J. Siegel, "High capacity hydrogen storage materials: Attributes for automotive applications and techniques for materials discovery", *Chemical Society Reviews*, Vol. 39, No. 2, 2010, pp. 656-675.
- 12) S. Mellouli, F. Askri, H. Dhaou, A. Jemni and S. Ben Nasrallah, "Numerical simulation of heat and mass transfer in metal hydride hydrogen storage tanks for fuel cell vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 4, 2010, pp. 1693-1705.
- 13) T. Forde and Q. Ulleberg, "Thermal integration

- of a metal hydride storage unit and a PEM fuel cell stack”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 2009, pp. 6730-6739.
- 14) Z. Jiang, R.A. Dougal, S. Liu, S.A. Gadre, A.D. Ebner, and J.A. Ritter, “Simulation of a thermally coupled metal-hydride hydrogen storage and fuel cell system”, *Journal of Power Sources*, Vol. 142, 2005, pp. 92-102.
- 15) G.L. Guizzi, M. Manno, and M. Defalco, “Hybrid fuel cell-based energy system with metal hydride hydrogen for small mobile applications”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 3112-3124.
- 16) <http://www.hydrogencomponents.com>.
- 17) M. Visaria, I. Mudawar, and T. Pourpoint, “Enhanced heat exchanger design for hydrogen storage using high-pressure metal hydride - Part 2. Experimental results”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, 2011, pp. 424-432.
- 18) P. Muthukumar, and M. Groll, “Metal hydride based heating and cooling systems: A review”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, pp. 8816-8829.
- 19) T. Nishizaki, K. Miyamoto, and K. Yoshida, “Coefficient of performance of hydride heat pumps”, *Journal of the Less Common Metals*, Vol. 89, 1983, pp. 559-566.