

MgO/H₂O계 화학식 열펌프의 열적 특성에 관한 연구

권 오 경[†], 윤 제 호, 김 정 옥*, 이 진 호**, 加藤之貴***

한국생산기술연구원, *연세대학교 기계공학과 대학원, **연세대학교 기계공학과, ***동경공업대학

A Study on the Thermal Characteristics of a MgO/H₂O Chemical Heat Pump

Oh-Kyung Kwon[†], Jae-Ho Yun, Jung-Wook Kim*, Jinho Lee**, Yukitaka Kato***

Cleaner Production Design Technology Team, Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 330-825, Korea

[†]Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

^{**}Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

^{***}Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8550, Japan

(Received July 30, 2003; revision received November 19, 2004)

ABSTRACT: The chemical heat pump based on the Dehydration/Hydration process with a MgO/H₂O system has been researched. The reactor bed could be expected to store the heat around 200~370°C by the dehydration reaction and to release the heat around 100~160°C by the hydration reaction under the heat amplification mode operation. The heat output rate of the heat pump system was evaluated using the experimentally determined parameters. The results show that 6~50 W/kg of heat output and 0.5~0.8 of heat recovery ratio are attainable. The heat pump will be applicable for a load leveling in a co-generation system by chemical storage of surplus heat at low heat demand and by supplying heat in the peak load period.

Key words: Heat pump(히트펌프), Dehydration(탈수), Hydration(수화), Magnesium oxide(산화 마그네슘), Heat storage(축열), Heat output(열출력), Co-generation(열병합발전)

기 호 설 명

c_p : 냉각수 비열 [kJ/kgK]

ΔH : 반응의 엔탈피 변화 [kJ/kg]

L_i : 수산화마그네슘의 초기질량 [kg]

M : 분자량 [g/mol]

\dot{m} : 질량유량 [kg/h]

Δm : 물량 변화 [kg]

P : 반응압력 [kPa]

q_h : 발생된 수화열 [kJ/kg]

q_{rcv} : 수화반응시 MgO의 단위질량당 총회수열 [kJ/kg]

r_r : 열회수비 [-]

T : 온도 [°C]

t : 반응시간 [min]

x : 반응분율 [-]

Δx : 반응분율 변화 [-]

w_{rcv} : 수화반응시 MgO의 단위질량당 열회수율 [W/kg]

하첨자

[†] Corresponding author

Tel: +82-41-589-8528; fax: +82-41-589-8330

E-mail address: kwonok@kitech.re.kr

b : 플레이트 상단부에서의 200 mm 길이

c : 응축

- d : 탈수반응
 f : 플레이트 벽면 대표 측정지점
 h : 수화반응
 m : 플레이트 상단부에서의 150 mm 깊이
 o_1 : 플레이트의 반경 70 mm와 깊이 100 mm 지점
 o_2 : 플레이트의 반경 100 mm와 깊이 100 mm 지점
 t : 플레이트 상단부에서의 100 mm 깊이
 v : 증발

1. 서 론

오늘날의 과학기술이 직면한 에너지 자원의 유한성과 에너지 이용에 있어 필연적인 환경문제의 해결은 산업에 있어 공정의 생산성과 경제성 확보에 척도가 되며 삶의 질의 향상에 필수적 요건이다. 국내 산업계에 사용되는 에너지 총량의 약 2/3 정도가 유용한 에너지로 활용되지 못한 채 손실되거나 자연계에 여러 형태로 폐기되고 있으며, 절약 가능한 미활용 폐기에너지량의 약 50%를 회수, 재활용하여 보상될 수 있다면 비용으로 환산하여 막대한 값이 되며 이들 폐기에너지의 약 10%만 활용할 수 있다 할지라도 우리나라 총 에너지의 약 3%를 절약하는 효과를 기대할 수 있는 것이다.

산업배열을 회수, 활용할 수 있는 기술로서는 열교환 집적기술, 열펌프 및 냉동기술, 기계적 증기 재압축기술, 그리고 에너지 저장 및 화학축열 기술^(1,2) 등을 들 수 있으며 이러한 기술 중에서 가장 관심을 받고 있는 분야는 열교환 집적기술 및 열펌프기술이다. 열펌프는 일을 가해 줌으로써 무용한 에너지를 유용한 에너지로 전환시키는 기관으로서 기계식과 화학식이 주로 이용되고 있다. Wongsuwan et al.⁽³⁾은 화학적 열펌프를 화학반응의 형태에 따라 흡착식/흡수식/화학반응식 등으로 세분화하였고 그에 따르면 MgO/H₂O계 화학식 열펌프는 화학반응을 이용한 수계(water system)에 속하는 열펌프이다.

현재 상용화되고 있는 열펌프에는 증기압축식, 흡수식, 흡착식 열펌프 등이 있지만 이러한 기존의 열펌프들은 에너지 밀도, 작동온도, 부식성, 효율 및 승온폭에 한계가 있기 때문에 생산공정

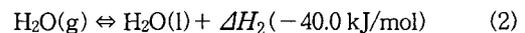
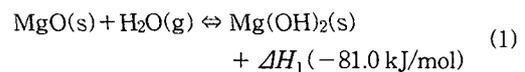
으로부터 배출되는 막대한 양의 배열을 회수하여 재이용하는 데 이용되기보다는 냉동 및 건물의 냉난방 등의 용도에만 이용되고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 제시된 새로운 방식의 열펌프가 화학식 열펌프이다. 화학식 열펌프는 가역반응을 이용해서 흡열반응에 의해 열을 저장하고 발열반응에 의해 열을 방출하며 반응조건을 제어하는 것에 의해 저온에서 흡열, 고온에서 발열하는 것도 가능하다. 또한 안정된 화학물질의 생성 엔탈피를 축열함으로써 장시간의 축열이 가능하며, 1차 에너지를 직접 이용하기 때문에 효율이 높음은 물론 장치 면에서 구동되는 부분이 없어 수명이 길고 고온에서 사용이 가능할 뿐만 아니라 소음공해가 없는 장점을 가지고 있다. 따라서 화학식 열펌프기술은 새로운 분야로서 종래의 축열성능의 범주를 크게 증가하여 현재 당면하고 있는 에너지 문제를 해결할 수 있는 가능성을 갖고 있는 기술이다.

본 연구에서는 각 공정에서 배출되는 70~80℃의 배열을 실제 공정에서 사용할 수 있는 온도대인 130~140℃로 유용하게 사용할 수 있도록 소형 화학식 히트펌프를 설계, 제작하여 축열운전·열출력 운전시의 반응특성 규명과 반응조 내의 전열 및 유동현상을 규명하며 열유동을 평가하고자 한다.

2. 화학식 열펌프의 작동원리

본 연구에서 수행한 MgO/H₂O계의 반응식은 아래와 같다.



여기서, ΔH_1 , ΔH_2 는 각각 반응과 응축에 동반되는 생성 엔탈피의 변화이다.

Fig. 1은 화학식 열펌프의 운전원리를 나타낸 것이다. 열펌프 사이클은 축열모드(heat storage mode)와 열출력모드(heat supply mode)로 구성되며 축열과정과 열출력과정을 1사이클로 하였다. 먼저 Mg(OH)₂ 반응재료는 용기 I 내에 충전하며, 작동원리는 다음과 같다.

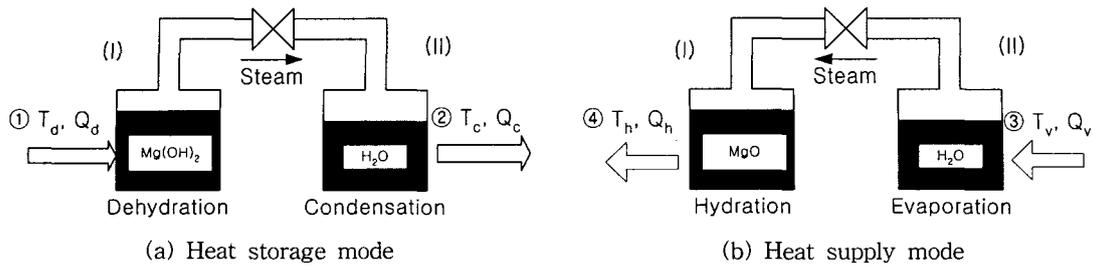


Fig. 1 Schematic diagram of MgO/H₂O chemical heat pump.

① 축열운전(탈수운전)에서 Fig. 1의 용기 I는 가열되어 온도 T_d 의 열 Q_d 를 얻게 되고 $Mg(OH)_2$ 는 탈수반응을 일으켜서 MgO 로 변화하고 수증기를 발생한다. 수증기는 배관을 통해서 용기 II에 들어간다.

② 용기 II에는 온도 T_c 로 수증기를 응축시켜 응축열 Q_c 를 회수한다. 여기서 수증기는 물이 되어 용기 II에 저장된다.

③ 열출력운전(수화운전)에서 Fig. 1의 용기 II의 물은 대기온도 T_v 에서 증발열 Q_v 를 얻어서 증발한다. 수증기는 배관을 거쳐 용기 I에 들어간다.

④ 용기 I 내에는 MgO 가 수화반응을 일으켜서 $Mg(OH)_2$ 로 변화하고 온도 T_h 에서 발생열 Q_h 를 발생한다.

이 반응과 상변화의 평형선도를 Fig. 2에 나타내었다. 평형선도는 온도 (T)와 압력 (P)으로 나

타내었으며 반응평형선 P_e 와 물의 상변화평형선 P_s 는 거의 직선으로 나타내어진다. Fig. 1의 열펌프 사이클의 ①-②-③-④는 Fig. 2의 번호와 일치한다. 즉, ①에서 고온도의 열을 흡수하고, ②에서 중온도의 열을 방출한다. ③에서 저온도의 열을 흡수하고, ④에서 중온도의 열을 방출한다. 이 축열운전과 열출력운전을 조합시키는 것에 의해서 열펌프운전을 행하는 것이 가능하다.

열구동형 화학식 열펌프는 기계적 일을 사용하지 않고 온도 T_d 및 T_v 의 열원과 밸브의 개폐만으로 운전을 행하며, 용기 I과 용기 II의 증기압의 차로 탈수·수화반응을 행한다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략적인 구성을 Fig. 3에 나타내었다. 실험장치는 크게 반응기(reactor), 반응조(water reservoir) 및 응축기(condenser)로 나눌 수 있으며 그외 히터, 항온조, 슬라이더스, 진공펌프, 물펌프, 유량계, 각종 밸브 및 호스로 연결되어 있고 온도와 압력을 측정하기 위한 측정부로 구성되어 있으며 각 기기들은 스테인레스관으로 연결되어 있다.

반응기의 외부치수는 높이 430 mm, 지름 450 mm이며 내부의 열교환기는 구리로 된 롤링플레이트를 50 mm 간격으로 감아, 높이 200 mm에 반경 320 mm이며, 그 아랫면에 0.7 kW급의 시스히터(sheath heater) 2개를 설치하였으며 튜브형 열교환기는 롤링플레이트의 윗부분에 설치하였다. 또한 반응기 내부에는 유로를 빠져나온 증기가 반응물질의 일부분과 불균일하게 접촉하여 반응하는 것을 막기 위해 커버(cover)를 설치하였으

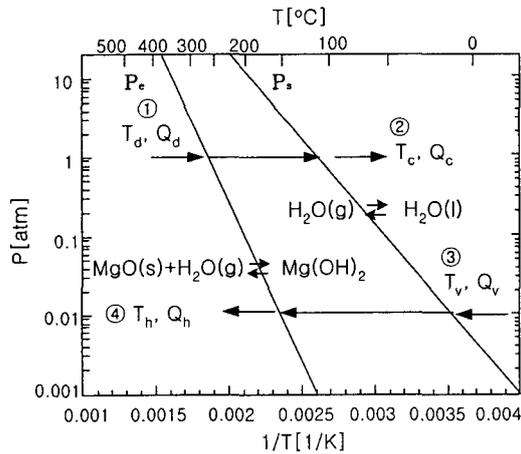
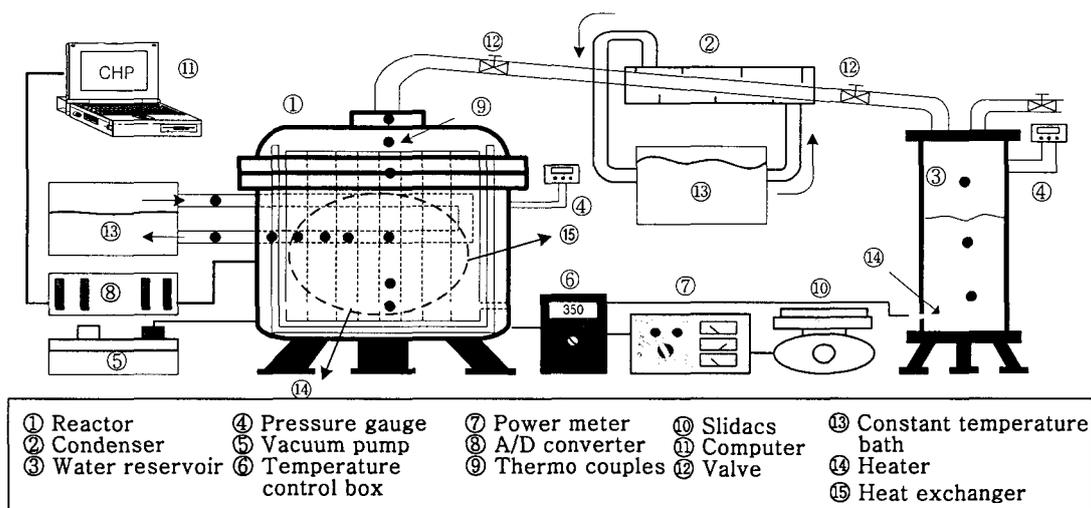


Fig. 2 Equilibrium diagram of chemical heat pump.

Fig. 3 Schematic diagram of MgO/H₂O chemical heat pump system.

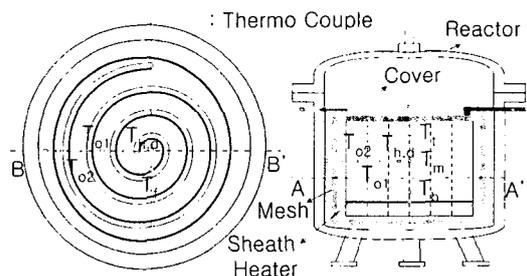
며 몰링플레이트와 반응물질이 잘 접촉할 수 있도록 mesh형의 망을 설치하였다. 반응기 외부에는 반응조에서 발생한 증기의 응축을 방지하기 위해서 0.7 kW급의 시스히터를 감아서 제어하였다. 응축기는 대향류형으로써 내부에 핀을 달아 전체적으로 균일하게 냉각이 되게 만들었으며 반응조의 내경은 150 mm이고 높이가 320 mm이며 0.9 kW급의 카트리지 히터(cartridge heater)가 설치되었다.

반응시의 실험조건 설정과 측정을 위해서 Fig. 4와 같이 반응기 내에 깊이방향으로 6개, 반경방향으로 5개, 반응조 내에 높이별로 3개의 K-Type 열전대를 설치하였고 최대 측정압력이 200 kPa인 PG-35(Copal Electronics Inc.) 압력계 2개를 설치하였다. Fig. 5는 반응기 베드에 채워지는

반응물질로서 99.9% 고순도의 수산화마그네슘이다. 직경이 1.9 mm이고 길이가 2~10 mm이며 평균 입자직경(pore size)은 10 nm로서 열전도율은 0.236 W/m·K이며 초미세 산화마그네슘 파우더로부터 제조된 일본의 U사 제품이다. 일반 Mg(OH)₂보다 내구성이 뛰어나며 Kato et al.⁽⁴⁻⁷⁾은 24회 이상 반복실험에도 일정한 재현성을 보인다고 보고하였다. 본 실험에서는 반응기 내부에 10 kg의 Mg(OH)₂를 채워서 실험을 하였다.

3.2 실험방법

본 실험은 탈수모드(Dehydration Mode)와 수화모드(Hydration Mode)를 하나의 사이클로 하여 각각 진행하였다.



(a) Top view (A-A') (b) Cross-section view (B-B')

Fig. 4 Position of thermo couples for reactor bed.

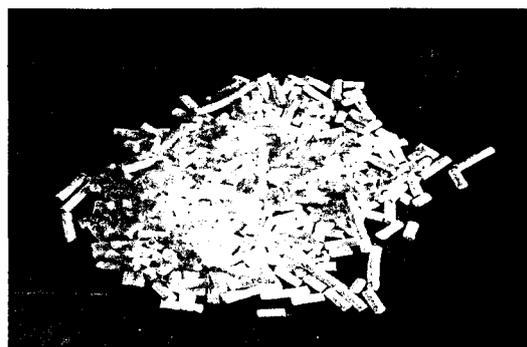
Fig. 5 A shape of a Mg(OH)₂.

Table 1 Experimental conditions with water reservoir temperature changes

	Reactor bed temp. [°C]	Water reservoir temp. [°C]	Reactor water temp. [°C]	Water reservoir pres. [kPa]
Case 1	110	80	85	47.4
Case 2	110	90	95	70.1
Case 3	110	100	105	101.35

Table 2 Experimental conditions with reactor bed temperature changes

	Reactor bed temp. [°C]	Water reservoir temp. [°C]	Reactor water temp. [°C]	Water reservoir pres. [kPa]
Case 1	110	90	95	70.1
Case 2	120	90	95	70.1
Case 3	130	90	95	70.1

탈수모드는 반응기 내부의 압력상승률을 2 kPa 이하로 하여 절대압력 8.32 kPa 이하로 유지시키며 공기의 유입을 막고 반응기 내부의 시스히터(sheath heater)에 의한 T_f 의 온도가 실험조건상의 실험온도를 유지할 수 있도록 파워메타(WT-130 Yokogawa사)와 연동시켜 슬라이다스의 입력값을 조절한다. 탈수반응시에는 외부히터(outside heater)는 사용하지 않았으며 T_f 의 온도가 200°C 이상이 되면 탈수가 일어나게 되므로 이때 밸브를 열어 준다. 이때 응축기에 항온조로부터 조절된 10°C의 물로 순환시켜 발생증기를 반응수조 내부에 응축시킨다. 그리고 매 5분마다 물의 높이변화를 기록하였으며, T_d 의 온도가 T_f 와 같아지게 되면 탈수반응은 끝나게 된다.

수화반응 또한 반응기 내부의 압력상승률을 2 kPa 이하로 하여 절대압력 8.32 kPa 이하로 유지시켜 공기의 유입을 막으며 반응기의 내부온도는 탈수반응 이후에 자연적으로 냉각되게 하여 약 10~13시간이 흐른 후에 T_f 와 T_h 의 온도는 110~130°C 정도를 유지하게 되는데 이때 만약 온도가 실험조건 온도 이하일 경우 내부히터를 사용하여 온도를 실험조건 온도로 가열시켜 준다. 또한 외부히터를 사용하여 반응기 내부로 유입되는 증기의 응축을 방지시키기 위해 반응기의 외벽의 온도를 100°C로 상승 유지시킨다.

본 실험에서는 반응기 베드의 온도를 110°C로 고정시키고 반응수조의 증기의 온도를 Table 1과 같이 80, 90, 100°C로 변화시켜 그 영향을 알아보았으며, Table 2와 같이 반응수조의 증기의 온도

를 90°C로 유지시키고 반응기 베드의 온도를 110, 120, 130°C로 변화시켜 실험을 하였다. 반응기 내부로 순환시켜 열교환이 되게 하는 물의 온도는 매 실험시 반응수조의 증기의 온도보다 항상 5°C 이상으로 유지시킨 후 밸브를 열어 증기가 반응기 내부로 유입되게 하고 수화반응이 일어날 수 있는 조건을 만들어 준다. 이때 매 5분마다 줄어드는 물량의 변화를 기록한다. 수화반응이 일어나면 반응기 내부의 T_h 의 온도가 20~60°C의 승은 폭으로 상승하게 되며 항온조의 물을 300 liter/hr로 열교환튜브로 순환시킨다. 이때 물의 시간당 순환량은 물의 입/출구 온도차를 고려하며 온도 측정의 정확도가 실험결과치에 미치는 영향 등을 감안하여 결정하였다.

3.3 실험 데이터 처리

3.3.1 반응분율

각각의 반응에 의해 반응조 내의 물량의 변화가 있으며 반응분율 $[x]$ 은 식(3)과 같다.

$$x = 1 + \frac{\Delta m / M_{H_2O}}{m_{Mg(OH)_2} / M_{Mg(OH)_2}} \quad (3)$$

여기서, $Mg(OH)_2$ 는 수산화마그네슘의 초기 질량이다.

각각의 수화반응의 비교를 위해 식(4)와 같은 반응분율의 변화인 Δx 를 이용하였다.

$$\Delta x = x_h - x_{sd} \quad (4)$$

여기서, x_h 와 x_{sd} 는 각각 수화반응의 반응분율과 앞 단계의 탈수반응시의 포화된 탈수 반응분율을 나타낸다.

3.3.2 열회수율

초기의 Mg(OH)₂의 단위질량당 수화열출력은 열교환 튜브에 순환되는 냉각수에 의해 회수되며 열회수율은 식(5)와 같다.

$$w_{rcv} = \dot{m}c_p\Delta T/L_i \quad (5)$$

3.3.3 총회수열

냉각수에 의해 회수된 총회수열은 식(6)과 같다.

$$q_{rcv} = \int w_{rcv} dt_h \quad (6)$$

3.3.4 발생수화열

발생된 수화열은 식(7)과 같다.

$$q_h = |\Delta H_1| \times \Delta x / M_{Mg(OH)_2} \quad (7)$$

3.3.5 열회수비

열교환기에 의해 회수된 열회수비는 식(8)과 같다.

$$r_r = q_{rcv} / q_h \quad (8)$$

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 수화반응 실험으로서 초기 반응층온도

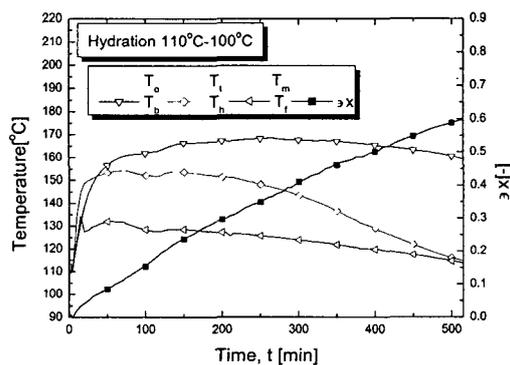


Fig. 6 The variation of reacted fraction and bed temperature with time.

(T_h)를 110°C로 유지하고 공급 수증기온도(T_v)의 온도를 100°C로 한 경우의 반응기 내부의 온도변화와 반응분율(Δx)을 나타낸 것이다.

대표온도로 잡은 T_h 의 온도분포를 보면 수화반응 개시 후 곧바로 온도피크가 일어난다. 이것은 산화마그네슘 분체에 수증기가 접촉하면 단시간에 산화마그네슘 표면에 흡착한다. 이 현상을 물리흡착이라고 하고 이후 화학반응이 진행된다. 산화마그네슘 분자의 표면에 수증기가 흡착하는 속도는 대단히 빠르며, 물리흡착에 따라 발열이 온도상승의 원인이 된다. 물리흡착은 입자 표면에 결합되어 흡착열은 보통 40 kJ/mol 이하의 발열이 있다. 그후 화학반응에 의한 발열로 81 kJ/mol로 물리흡착에 비해 크다. 반응기 내부의 온도분포는 2가지 경향을 보였으며 열교환부와 맞닿은 곳(T_i , T_h , T_f)의 온도감소가 크게 나타났으며, 열교환기와 상대적으로 떨어진 부분(T_b , T_m , T_o)은 오랜 수화열을 유지하였다. 반응분율은 시간이 경과함에 따라서 점진적으로 증가하였으며 9시간이 지난 후에 약 0.6이었다.

Fig. 7은 탈수반응 실험으로서 반응기 내부의 반응층 온도(T_d)를 370°C로 유지하였을 때 반응분율과 반응기 내부의 온도변화를 나타낸 것이다. 반응분율의 변화는 200°C에서 시작되어 370°C에서 완료되었고 10시간 후에 약 0.55였다. 반응층 내부 온도분포의 변화는 히터의 영향과 전도와 대류모드에 의해 플레이트의 바닥쪽에서 위쪽으로 확산되었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 수화반응 실험으로서 초기 반

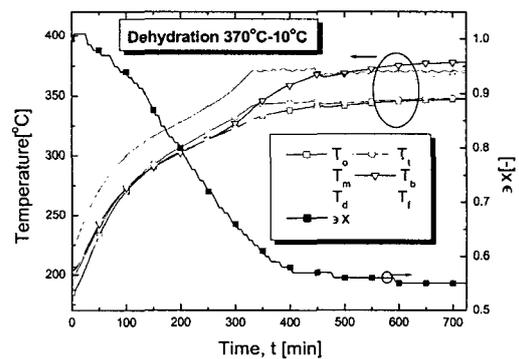


Fig. 7 The variation of reacted fraction and bed temperature with time.

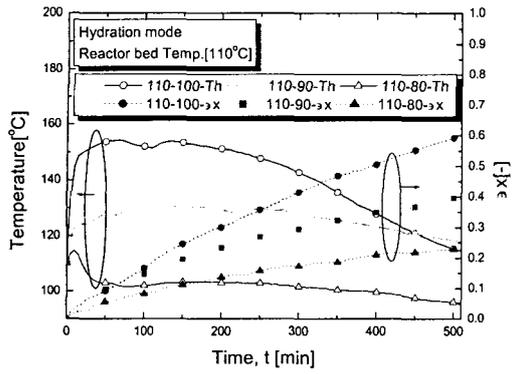


Fig. 8 The variation of reacted fraction amount and bed temperature with time.

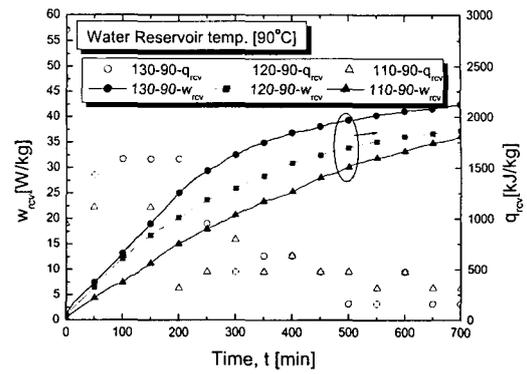


Fig. 11 The variation of heat recovery rate and total recovered heat with time.

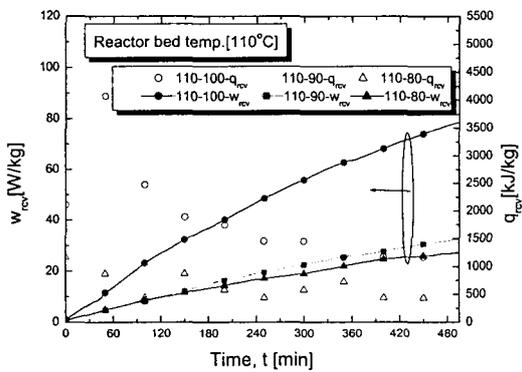


Fig. 9 The variation of heat recovery rate and total recovered heat with time.

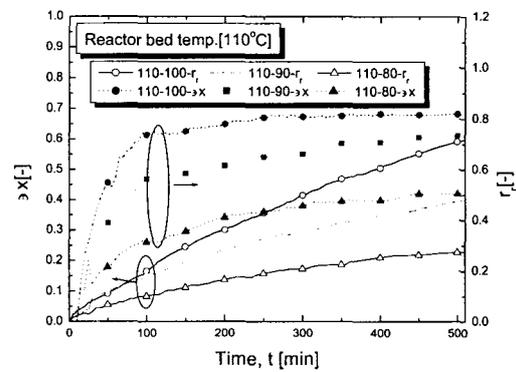


Fig. 12 The variation of reacted fraction amount and heat recovery ratio with time.

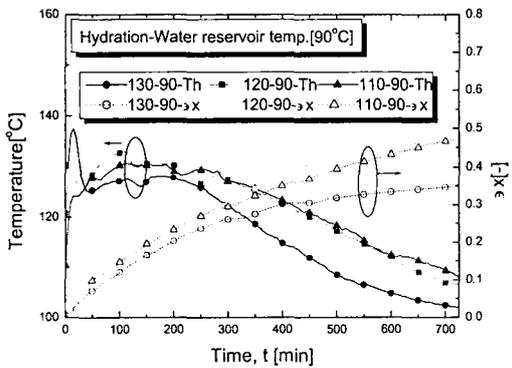


Fig. 10 The variation of reacted fraction amount and bed temperature with time.

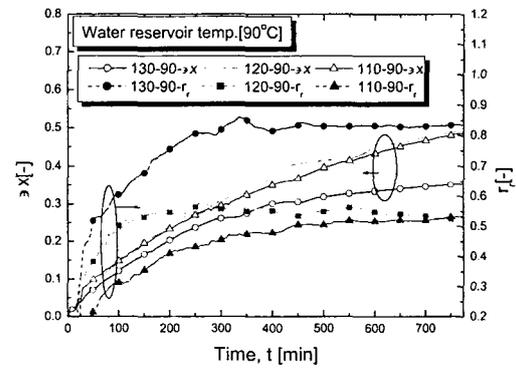


Fig. 13 The variation of reacted fraction amount and heat recovery ratio with time.

응축온도 (T_h)를 110°C로 고정하고 공급 수증기 온도 (T_v)를 80~100°C로 변화시켰을 때의 실험 결과를 나타낸 것이다. Fig.8은 시간에 따른 온

도, 반응분율의 변화를 Fig.9는 시간에 따른 열 출력, 총회수열의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 수증기를 도입한 시간을 수화반응시간 0 min으로

하였다. 반응기 내부의 온도는 밸브를 열고난 후 바로 상승하기 시작하여 최대 160℃ 가까이 이르렀으며, 반응분율(reacted fraction)은 증기압이 높을수록(100℃ > 90℃ > 80℃) 활성화되었으며, 열출력량은 100℃ 증기압인 경우에 20~50 W/kg 정도 였으며 80℃, 90℃의 경우에 6~23 W/kg으로 나타났다.

Fig. 10과 Fig. 11은 공급 수증기온도를 90℃로 고정하고 초기 반응층온도(T_h)를 110~130℃로 변화시켰을 때의 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 10은 시간에 따른 온도, 반응분율의 변화를 Fig. 11은 시간에 따른 열출력, 총회수열의 변화를 나타낸 것이다. 반응분율은 120℃와 110℃는 거의 유사한 경향을 보였으며 130℃는 이보다 반응이 낮게 나타났으며 열출력량은 평균 10~20 W/kg 정도이며 최대 30~35 W/kg까지 출력되었으며 11시간 경과 후에 총회수열은 1600~2300 kJ/kg이었다.

Fig. 12와 Fig. 13은 초기 반응층온도(T_h) 및 공급 수증기온도 변화에 대해서 반응분율과 열회수율의 변화를 나타낸 것이다. 반응층온도를 110℃로 고정시킨 경우와 공급 수증기온도를 90℃로 고정시킨 경우 열회수비는 0.5~0.8의 변화를 보였다. Kato et al.⁽⁶⁾에 의하면 MgO/H₂O계 화학식 열펌프의 이론적인 열회수비는 1.5이므로 실제 적용을 위해서는 반응기 형상변화 및 전열촉진 방안이 모색되어야 할 것이다.

5. 결 론

MgO/H₂O계 화학식 열펌프의 반응특성 및 열출력 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 실험에서는 초미세 산화마그네슘 파우더로 제조된 제품을 적용하여 화학식 열펌프의 성공적인 구동에 목표를 두고 행하였으며 탈수와 수화의 연속적인 가역적 반응의 가능성을 확인하였다.

(2) 반응분율(reacted fraction)은 같은 반응층 온도에서 증기압이 높을수록(100℃ > 90℃ > 80℃) 활성화되었으며 같은 증기압에서 반응층 온도를 변화시켰을 때는 110℃와 120℃는 유사했으며 이에 비하여 130℃는 낮게 나타났다.

(3) 열출력량(w_{rev})은 실험조건에 따라서 6~50 W/kg 정도 출력되었으며 열회수비(r_r)는 0.5~0.8의 변화를 보였다.

(4) 향후에는 열교환기 표면에 핀부착 유무 등을 통하여 화학식 열펌프의 열출력 증대를 위한 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

- Bhatti, A. S. and Dollimore, D., 1984, The rates of hydration of sea water magnesia, *Surface Technology* 22, pp. 181-188.
- Kato, Y., Kobayashi, K. and Yoshizawa, Y., 1998, Durability to repetitive reaction of magnesium oxide/water reaction system for a heat pump, *Applied Thermal Engineering* 18, pp. 85-92.
- Wongsuwan, W., Kumar, S., Neveu, P. and Meunier, F., 2001, A review of chemical heat pump technology and applications, *Applied Thermal Engineering* 21, pp. 1489-1519.
- Kato, Y., Yamashita, N., Kobayashi, K. and Yoshizawa, Y., 1996, Kinetic study of the hydration of magnesium oxide for a chemical heat pump, *Applied Thermal Engineering* 16, pp. 853-862.
- Kato, Y., Nanmoku, W., Takahashi, F. and Yoshizawa, Y., 1997, Reaction durability of a magnesium oxide/water chemical heat pump, *Proceedings of 32nd Intersociety of Energy Conversion Engineering Conference*, Vol. 2, pp. 1246-1251.
- Kato, Y. and Yoshizawa, Y., 1999, Thermal performance of a cogeneration system using a chemical heat pump, *Proceedings of International Sorption Heat Pump Conf.*, pp. 557-562.
- Kato, Y., Minakami, A. and Yoshizawa, Y., 2001, Operability analysis of a thermally driven magnesium oxide/water chemical heat pump, *Proceedings of the 2nd International Heat Powered Cycles*, Vol. II, pp. 373-379.