

## 수소저장합금을 이용한 열수송시스템 제어기술 연구

심규성, 김종원, 김정덕, 명광식

한국에너지기술연구소 대체에너지연구부  
대전시 유성구 장동 71-2, 305-343

### Study on the control technique for the heat transportation system using metal hydride

K. S. Sim, J. W. Kim, J. D. Kim, and K. S. Myung

Dept. of Alternative Energy, Korea Institute of Energy Research  
71-2, Jang-dong, Yusong-ku, Taejon, 305-343, Korea

#### 초록

현재 증기나 온수에 의한 열수송은 배관을 통하여 열손실 및 마찰손실 등이 발생하므로 수송거리는 3 내지 5km가 한계이다. 그러나 대부분의 공단이 도시지역에서 10km 이상 떨어져 있으므로 이들 지역에서 발생하는 폐열을 적절히 활용하기 위해서는 새로운 열수송 시스템이 개발되어야 한다. 수소저장합금은 수소를 흡수 또는 방출하면서 발열반응과 흡열반응을 일으키는 특성을 가지고 있으므로 산업공단지역의 폐열로부터 수소저장합금의 수소를 방출시키고, 이 수소를 인근 도시지역에 파이프라인으로 수송한 후 필요시 또 다른 수소저장합금과 반응시켜 열을 얻을 수 있다. 이 시스템에서는 난방의 목적 외에도 수소의 흡수·방출온도가 낮은 합금을 이용하여 냉열을 얻을 수도 있다. 따라서 수소저장합금은 폐열의 저장이나 열수송의 수단으로 활용할 수 있다.  $MmNi_{4.5}Al_{0.5}Zr_{0.03}$ ,  $LaNi_5$ ,  $Zr_{0.9}Ti_{0.1}Cr_{0.6}Fe_{1.4}$ ,  $MmNi_{4.7}Al_{0.1}Fe_{0.1}V_{0.1}$  합금들이 열수송에 적합한 합금으로 선정되어 그 특성을 검토하였으며, 열수송시스템의 설계 및 제어기술에 대하여 검토하였다.

## Abstract

The heat transportation from a complex of industry to a rural area needs more efficient method because the distance between them is usually more than 10km. Conventional heat transportation using steam or hot water via pipe line has limits in transportation distance (about 3~5 km) because of the heat loss and frictional loss in the pipe line. Metal hydride can absorb or discharge hydrogen through exothermic or endothermic reaction. After releasing hydrogen from metal hydride by means of the waste heat from industry, we can transport this hydrogen to urban area via pipe line. In urban areas, other metal alloy reacts with this hydrogen to form metal hydride and produces heat for heating. Cool heat is also obtained if it is possible to use metal hydride with low reaction temperature. Therefore, metal hydride can be used as a media for transportation and storage of heat.  $MmNi_{4.5}Al_{0.5}Zr_{0.03}$ ,  $LaNi_5$ ,  $Zr_{0.9}Ti_{0.1}Cr_{0.6}Fe_{1.4}$ ,  $MmNi_{4.7}Al_{0.1}Fe_{0.1}V_{0.1}$  alloys were selected for this purpose and the properties of those metal hydrides were discussed. The design and control techniques were proposed and discussed for this heat transportation system using metal hydride.

## 1. 서론

산업단지에서 손실되는 막대한 폐열을 효율적으로 회수하여 이를 저장하고 활용하기 위해서는 이에 적합한 저장수단과 이를 필요로 하는 도시지역에 수송하는 기술이 필요하다. 현재 온수나 증기에 의한 열수송은 배관을 통하여 열손실 및 마찰손실 등이 발생하므로 수송거리는 3 내지 5km가 한계이다. 그러나 대부분의 공단이 도시지역에서 10km 이상 떨어져 있으므로 이들 지역에서 발생되는 폐열을 적절히 활용하기 위해서는 새로운 열수송시스템이 개발되어야 한다.

수소저장합금은 수소를 흡수 또는 방출하면서 발열반응과 흡열반응을 일으키므로 공단지역의 폐열을 이용하여 수소저장합금으로부터 수소를 방출시키고 이를 도시지역에 파이프라인으로 수송한 후 필요시 수소저장합금과 반응시켜 열을 얻을 수 있다.<sup>(1-3)</sup> 또한 낮은 온도에서 수소의 흡수와 방출이 가

능한 합금을 이용하여 냉열을 얻을 수도 있다.<sup>(4-7)</sup> 이와 같이 방법은 폐열의 저장수단으로 또한 수소를 수송함으로써 열수송의 수단으로 활용할 수 있게 된다.

본 연구에서는 수소저장합금을 이용한 열수송시스템으로 공단지역에서 90℃ 정도의 폐열로부터 8~10기압의 수소를 얻고, 이를 수송하여 열수요처에서 65℃ 정도의 열원을 얻을 수 있는 열수송시스템 장치를 구성하였으며, 열수요처의 저급 열원으로 2기압 내외의 수소를 재생하여 이를 다시 공단지역에 수송하여 냉각수를 이용하여 수소저장합금을 재생하는 시스템을 구성하고, 이를 제어할 수 있는 제어시스템을 설계하였다.

## 2. 수소저장합금의 선정

### 2-1 수소저장합금의 설계

수소저장합금을 실제 응용분야에 적용하기 위해서는 각기 그 분야에서 요구하는

수소저장특성을 갖추어야 하는데, 수소저장 합금은 합금원소의 첨가나 치환 등의 합금 설계로 수소화 반응특성을 쉽게 변화시킬 수 있어 각 적용분야에서 요구되는 특성을 갖춘 합금을 개발, 선정하는 작업이 가능하다. 열수송시스템에 적합한 수소저장합금이 갖추어야 할 구비조건은 다음과 같다.

- ① 평형수소압력이 폐열의 온도범위 (80-150℃)에서 10기압내외
- ② hysteresis가 적을 것
- ③ sloping특성이 우수할 것
- ④ 수소화 반응속도가 빠를 것
- ⑤ 큰 수소화 반응열 및 수소저장용량을 가질 것
- ⑥ 반복적으로 사용할 때 수소저장특성의 변화가 적을 것(긴 수명)
- ⑦ 수소저장합금의 제조단가가 저렴할 것

이와 같은 조건을 모두 갖춘 수소저장합금은 아직까지 알려져 있지 않다. 지금까지 알려진 수소저장합금으로는 FeTi, Mg<sub>2</sub>Ni, LaNi<sub>5</sub>, MmNi<sub>5</sub>, Zr-based laves계가 있으며, 아직도 미국, 일본, 독일 등 여러 국가에서 그 특성을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서도 여러 종류의 수소저장합금계에 대하여 문헌조사 및 기본적인 수소화 반응특성을 조사하였으며, Zr계 수소저장합금 및 Mm계 수소저장합금계가 합금의 제조가격 및 기타 수소화 반응특성이 우수함을 알 수 있었다.

### 2-2 수소저장합금의 선정

본 연구에서는 열수송시스템용 수소저장 합금을 선정하기 위하여 Zr-based laves 화합물계와 MmNi<sub>5</sub>계 합금에 대하여 수소저장 용량, 평탄압력 등을 조사하였으며, 이와 같은 합금들에 대하여 활성화특성, 수소화 반응속도, 사이클링 특성을 평가하였다.

이와 같은 연구를 통하여 열수송시스템으로 적합한 수소저장합금으로 353~373K의 온

도범위에서 10기압내외의 수소방출압력을 갖는 LaNi<sub>5</sub>, MmNi<sub>4.5</sub>Al<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.03</sub>, Zr<sub>0.9</sub>Ti<sub>0.1</sub>Cr<sub>0.6</sub>Fe<sub>1.4</sub> 수소저장합금을 고온용으로, 273K에서 5기압내외의 수소방출압력을 갖는 MmNi<sub>4.7</sub>Al<sub>0.1</sub>Fe<sub>0.1</sub>V<sub>0.1</sub>합금을 저온용으로 선정하였다.<sup>(8)</sup>

### 2-3 선정된 수소저장합금의 특성

열수송을 위하여 선정된 네 가지 합금에 대하여 여러 가지 온도에 대하여 수소의 흡수 및 방출시험을 수행하였으며, 이들 중 MmNi<sub>4.5</sub>Al<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.03</sub> 합금에서의 실험결과를 보면 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

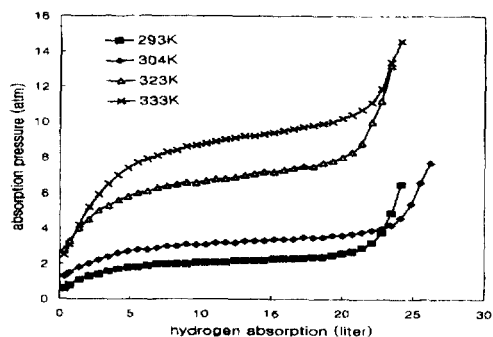


Fig. 2 Variation of hydrogen absorption pressures of MmNi<sub>4.5</sub>Al<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.03</sub> with various temperature(235.3g)

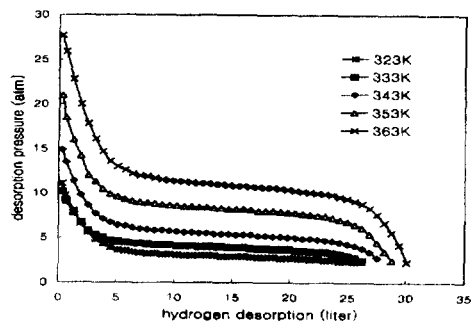


Fig. 1 Variation of hydrogen desorption pressures of MmNi<sub>4.5</sub>Al<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.03</sub>

설계기준 항목	열전송부	열수신부	비 고
반응기 수효	2기	2기	
운전(교체)주기	20분/회	20분/회	
수소 흡수/재생 반응열	7kcal/g-mole	7kcal/g-mole	여유치 포함
유효저장열량	500kcal/unit	500kcal/unit	
유효수소흡수재생량	71.43kg-mole	71.43kg-mole	

Table 1 Reactor number, operation interval and hydrogen absorption

설계기준 항목		열전송부		열수신부		비 고
		SOR	EOR	SOR	EOR	
흡수반응	반응기온도,℃	25	35	55	65	수소흡수시
	반응기압력,KG	2	1.5	10	8	
	열매공급온도,℃	25	25	55	55	
	열매배출온도,℃	35	35	65	65	
재생반응	반응기온도,℃	95	85	40	30	수소발생시
	반응기압력,KG	11	10	2.5	2	
	열매공급온도,℃	95	95	45	45	
	열매배출온도,℃	85	85	35	35	
수소저장합금		LaNi <sub>5</sub>		MmNi <sub>4.5</sub> Al <sub>0.5</sub> Zr <sub>0.03</sub>		

Table 2 Operational condition and applied metal hydride

SOR(Start of Run) : 운전초기조건, EOR (End of Run) : 운전말기조건, KG=kg/cm<sup>2</sup>g

### 3. 열수송시스템 설계

#### 3-1 공정규모

열수송시스템의 설계에서 전송열량은 1,500kcal/hr를 기준으로 하였다.

#### 3-2 반응기 수효, 운전주기 및 수소흡수량

열수송을 위하여 열전송부 및 열수신부에 각각 2기의 반응기가 필요하며, 운전주기는 1회에 20분으로 정하였다. 이에 따라 시간당 1,500kcal를 수송하기 위하여는 수소의 흡수

또는 재생 반응열이 7kcal/g-mole인 합금에서 반응기 1기당 유효저장열량은 500kcal이므로, 유효수소흡수 재생량은 71.43kg-mole이며, 이는 다음의 Table 1과 같다.

#### 3-3 반응기 운전조건 및 사용 수소저장합금

열전송부에는 LaNi<sub>5</sub> 합금을 열수신부에는 MmNi<sub>4.5</sub>Al<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.03</sub> 합금을 사용하도록 설계하였으며, 열전송부 및 열수신부에서 반응기의 운전조건은 Table 2에서 보는 바와 같다.

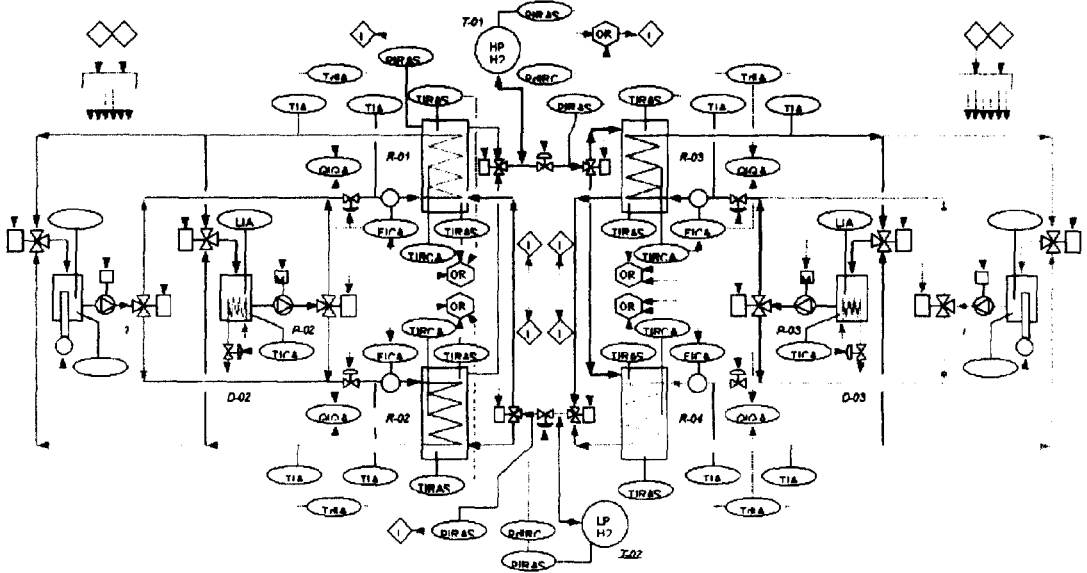


Fig. 4 Control system design of heat transportation unit

### 3-4 열수송시스템 설계

위와 같은 가정으로 1,500kcal/hr 용량의 열수송시스템 기본설계 완료하였으며, 그 개략도는 Fig. 3과 같다.

### 4. 제어시스템 설계

이상과 같은 설계기준으로부터 열수송장치 제어시스템의 공정을 설계하고 구성하였으며, 제어계 설계와 제어를 위한 중요내용을 종합하면 다음과 같다.

- ① 반응기 운전전환제어
- ② 반응기 과열시 운전정지계통
- ③ 전기가열기 과열시 자동차단계통
- ④ 수소 과압시 운전정지시스템
- ⑤ 반응기 가열 또는 냉각열량지시 및 반응기 온도조절
- ⑥ 자동 및 수송조절모드, 기타사항

앞서의 사항들을 고려하여 열수송장치 제어계통을 설계한 계통도는 Fig. 4와 같으며, 이를 바탕으로 제어프로그램을 구성하였다.

### 5. 시스템 제어기술

#### 5-1 반응기 운전방식

열전송부와 수신부 반응기는 각각 2기의 반응기를 설치하여 상호 교대로 번갈아 수소의 흡수와 방출을 반복하여 운전된다. 수소의 흡수 또는 방출의 반응과정이 완료되면 즉시 교체(전환)되어 운전되며, 열전송부와 수신부는 운전주기를 서로 달리하여 운전될 수 있도록 한다.

#### 5-2 부하 조절장치

열전송부와 열수신부에서 운전 전환시 정상 운전상태로 도달하기까지의 잠시(전이기간)동안 수소의 발생과 소비의 불균형을 조

열전송부 제어

[수소발생공정] → 운전전환 → [수소흡수공정] → 운전전환 → 순환

-가열매체공급	-고압수소차단	-저압냉수공급	-저압수소차단
-온도상승조절	-고압온수차단	-저압수소밸브개방	-저압냉수차단
-수소발생압력상승	-저압수소차단	-수소흡수압력저하	-고압수소차단
-반응기압력저하	-저압냉수차단	-반응기압력상승	-고압온수차단

열수신부 제어

-온수공급	-고압수소차단	-저압온수공급	-저압수소차단
-온도상승조절	-고압온수차단	-저압수소밸브개방	-저압온수차단
-수소흡수압력저하	-저압수소차단	-수소발생압력상승	-고압수소차단
-반응기압력상승	-저압온수차단	-반응기압력저하	-고압온수차단

절하기 위하여 수소저장탱크를 설치하여 부하를 흡수토록 한다. 전이기간 중에는 반응기의 압력 균일화 조작과 가열 혹은 냉각조작에 의하여 정상운전상태로 진입하는 중간상태의 운전조건으로 운전된다. 전이기간을 위한 부하 흡수능력은 5분간의 수소발생 또는 소요량으로 한다.

**5-3 반응기 제어방식**

반응기의 온도와 압력의 조절은 모두 반응기의 압력을 조절함으로써 이루어지도록 한다. 반응기의 압력조절은 수소의 공급유량을 자동 또는 수동으로 조절하여 반응속도의 조절이 이루어지도록 한다.

전체의 공정조작은 컴퓨터를 이용하여 자동으로 순차제어(Sequence Control)가 되도록 하고, 이상 발생시 긴급 차단하는 방법으로 장치를 보호하며, 온도와 압력 2가지 이상의 운전조작 변수를 감시하여 이상 발생시 자동 차단하도록 제어계를 구성한다.

**5-4 이상 회복조건**

긴급정지에 의하여 정지된 장치의 회복은 자동으로 이루어지지 않고 운전자의 선택에 의하여 이루어지도록 함으로서 기기장치의 안전을 꾀한다. 2단계 조작과정은 단순히 운전자가 지정한 시간경과에도 회복되지 않을 경우에 자동으로 이루어지도록 하고, 2단계 조치이후 정상운전 회복의 경우에도 운전자의 선택에 의한다.

**5-5 공정 운전제어**

이상에서 언급한 과정으로부터 운전조작을 위한 원칙을 종합하면 다음과 같이 제어 시스템을 구성할 수 있으며, 이를 기준으로 하여 자동으로 순차제어계와 비례조절계를 구성한다.

**6. 결론**

수소저장합금을 이용한 열수송을 위하여

에에 필요한 합금을 선정하였으며, 1,500kcal/hr 용량의 열수송시스템을 설계하고, 이 시스템을 제어하기 위한 제어시스템을 설계하였다. 시스템의 제어는 반응기의 압력을 제어함으로써 반응기의 온도와 압력을 함께 제어하는 방식을 택하였으며, 긴급 정지 및 이상회복 프로그램을 추가하여 자동으로 운전이 가능토록 하였다. 이상과 같은 운전조작을 위한 원칙을 종합하여 제어 시스템을 구성할 수 있으며, 이를 기준으로 하여 자동으로 순차제어계와 비례조절계를 구성하여 열수송시스템의 제어기술을 완성하였다.

#### 참고문헌

1. F.E. Lynch : J. of the Less-Common Metals, 172-174 (1991) 943
2. 太田時男, 金吉煥譯 : 수소에너지, 21세기 문화사 (1988)
3. 太田時男監修 : 수소에너지—最先端技術, (株)NTS (1995)
4. S. Fujitani, H. Nakamura, A. Furukawa, T. Yonesaki, K. Nasako, T. Saito and I. Yonezu : J. of Alloys and Compounds, 192 (1993) 170
5. I. Yonezu, et al. : J. Less-Common Met., 168 (1991) 201
6. 藤谷伸 외 : 제107회 일본금속학회 강연 개요 (1990) 206
7. I. Yonezu, S. Fujitani, A. Furukawa, K. Nakaso and T. Yonesaki : Sanyo Technical Review, 20 (1988) No.3
8. 심규성, 김종원, 한상도, 명광식 : 수소에너지, Vol.10, No.1, (1999) 41