

수소 저장합금층의 열전달 촉진을 위한 진동형 히트 파이프 적용에 관한 연구

이 민 재[†], 임 용 빈*, 배 상 철*, 김 종 수**

부경대학교 대학원, *사가대학 해양에너지 연구센터, **부경대학교 기계공학부

A Study of Application on the Pulsating Heat Pipe for Heat Transfer Enhancement of Metal Hydride Alloy

Min-Jae Lee[†], Yong-Bin Im*, Sang-Chul Bae*, Jong-Soo Kim**

Department of Refrigeration & Air Conditioning Engineering, Graduate School of Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

*Institute of Ocean Energy, Saga University, Japan

**Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

ABSTRACT: When metallic alloys are reacted to hydrogen, heat transfer of storage tank effects hydrogen storage rate and capacity. If pulsating heat pipe are used to improve heat transfer efficiency, production of hydrogen storage tank can be more simple and economical. Experiment of heat pipe was conducted by varying working fluids and heat flux. According to supply heat flux, test indicate that R-22 and R-142b were found lower temperature difference between evaporator and condenser than R-134a and Ethanol. Thermal resistances of R-22 and R-142b were also lower than others. Using R-142b as a working fluid, heat pipe type hydrogen storage tank is tested in absorption and desorption processes.

Key words: Pulsating heat pipe(진동형 히트 파이프), Absorption and desorption rate(흡장 및 탈장율), Metal hydride(금속수소화물), Hydrogen storage tank(수소저장탱크)

기호 설명

- A : 히트파이프의 증발부 표면적 [m²]
- D : 원형 동관의 홈 직경 [mm]
- D_o : 동관의 외경 [mm]
- Q : 히터에 의한 공급열량 [W]
- q : 히터에 의한 열유량 [kW/m²]
- R : 열저항 [K/W]
- T : 온도 [K]

하첨자

- eva : 증발부
- cond : 응축부

1. 서론

최근 인류가 가장 많이 사용하고 있는 에너지인 석유와 석탄, 천연가스 등의 고갈이 심화되어 감에 따라 새로운 대체에너지에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 대기오염문제와 더불어 화석연료의 고갈이 심각화됨에 따라

[†]Corresponding author

Tel.: +82-51-620-1502; fax: +82-51-611-6368

E-mail address: superflag@nate.com

대체 에너지로 태양열, 수력, 중력, 조력, 파력 등의 효율적인 사용을 위한 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 이러한 에너지들은 에너지 레벨이 낮은 저급 에너지로써, 이러한 에너지들의 실제적인 사용을 위해서는 에너지의 효율적인 저장과 운반, 적절한 이용 방법이 개발되어야 한다.

에너지의 저장 및 운반수단의 하나로, 순수 자연가스인 수소를 이용한 방법이 있다. 이 중 하나인 수소저장합금을 이용한 방법은 수소의 저장 및 방출반응을 일으키는 금속을 사용하며, 용기의 형태는 수소 물질전달 및 합금 열전달의 두 가지 메커니즘에 따라 설계되어질 수 있다. 물질전달은 합금이 충전되어 있는 용기 내에 수소를 주입하였을 때, 합금 표면에 수소 분자가 도달하는 상태를 의미하며, 원활한 물질전달을 위해서는 용기 내에 수소가 확산될 수 있는 경로가 필요하다. 열전달 메커니즘은 수소저장합금의 흡장·탈장 반응시 발생하는 흡·발열 현상을 의미하며, 이를 효과적으로 조절함으로써 흡장·탈장반응이 원활히 이루어지도록 할 수 있다.

합금의 수소화반응을 효율적으로 하기 위한 가장 좋은 방법은 수소저장용기 내부 합금층의 열전도를 향상시키는 방법이다. 이전부터 수소저장용기의 구조에 따른 열전달 향상을 위한 방법으로 합금용기에 외편이나 내편을 부착하여 전열면적을 늘리거나, 합금층 사이에 Al 또는 Cu 핀을 삽입하는 방법, 다공성의 금속 형태로 합금 분말을 이용하는 방법(1), 합금 분말과 바인더를 혼합시켜 고온압축이나 소결에 의해 고형화하는 방법(2), 고분자결합체를 이용한 성형체 제조 방법(3) 등이 연구되고 있다.

Groll et al.(4)은 수소저장용기의 물질전달 특성을 규명하기 위하여 Al 폼과 CaNi₅ 분말을 혼합하여 탱크를 채운 뒤, 탱크 내부에 필터를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우의 수소 흡수속도의 변화를 비교하였다. 그 결과, 탱크 내부에 필터를 설치한 경우가 3.6~4.2배의 빠른 흡수속도를 나타내었다.

Sim et al.(5)은 수소저장탱크의 구조를 여러 가지로 하여 탱크내부에 아무런 구조물이 없는 경우, 수소통로를 위한 금속 필터를 설치한 경우, 탱크의 표면에 연결되는 알루미늄 금속제 수직벽과 금속 필터를 설치한 경우, 컵 모양의 bed와 금속 필터를 사용한 경우를 각각 실험하였다. 결

과, 알루미늄 금속제 수직벽을 이용한 탱크가 가장 우수한 열전달 성능을 보이는 것으로 나타났으며 기존 컵 형태와 비교하였을 때, 성능이 같거나 더 우수한 것으로 나타났다.

Muthukumar et al.(6)은 동심관 형태의 수소저장용기로, 물을 이용하여 열원을 공급함으로써 열전달 성능을 향상시키는 형태로 구성하여, 수소의 공급압력, 공급열원의 열량 및 온도에 따른 수소의 흡장·탈장 성능을 평가하였다. 그 결과, 열전달 매체의 온도변화 및 열량 변화에 따라 금속의 수소화반응 속도에 큰 차이를 보였으며, 공급열량이 많을수록 수소저장량에는 영향이 없었으나 흡장·탈장 속도는 보다 빠른 결과를 보였다.

본 연구는 앞서 연구되어진 이중관 또는 편이달린 형상과 달리, 진동형 히트 파이프라는 열전달 매체를 이용하여 금속수소화 반응에 의한 수소저장용기의 열교환 과정이 원활히 이루어질 수 있는지를 평가해 보았다. 수소저장합금의 열전달 향상을 위한 최적의 열교환매체로서, 수소저장용기에 적합한 진동형 히트 파이프를 제작하여 각각의 작동유체에 따른 성능을 분석하였다. 히트 파이프의 성능 분석을 바탕으로 실제 수소저장용기와 히트 파이프를 결합하였을 때, 수소 흡·탈장반응이 적절히 이루어지는가를 확인하여, 히트 파이프의 적용 가능성을 검토하기 위하여 본 연구를 시행하였다.

2. 실험장치

히트 파이프의 성능 평가는 Fig. 1에서와 같이,

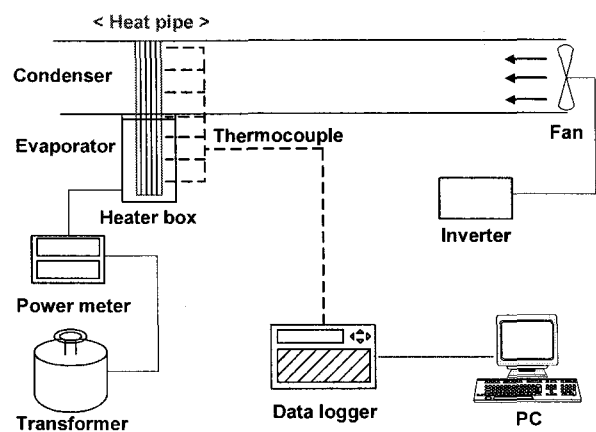


Fig. 1 Setup for performance test of heat pipe.

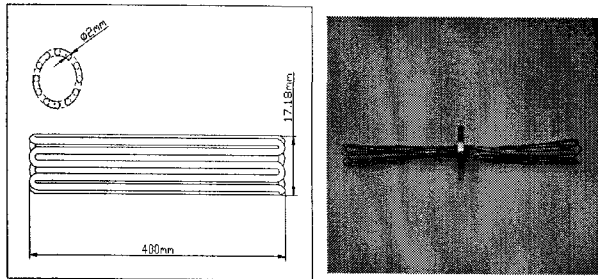


Fig. 2 Configuration of pulsating heat pipe.

응축부는 팬이 연결되어 있는 덕트를 이용하여 일정 속력의 팬으로 공기가 일정하게 유입되어 히트 파이프를 냉각시키도록 하였고, 증발부는 전기저항식 히터를 이용하여 히트 파이프에 열량을 공급하는 간단한 형태로 실행하였다.

2.1 히트 파이프

Fig 2와 같이, 원형관을 중심으로 좌측은 합금 용기에 삽입될 부분, 우측은 열전달매체에 의한 냉각, 가열부분이 되도록 하는 페루프 진동형 히트 파이프를 제작하였다. 중심부 원형관에 12개의 홈($D=2.2\text{ mm}$)을 뚫고 동관($D_o=2\text{ mm}$)을 12회 통과시킨 후, 원형관과 히트 파이프 동관을 용접하여 일체형 히트 파이프를 제작하였다.

2.2 증발부 열원 및 냉각장치

증발부측에서의 열원공급을 위하여 히트 파이프의 표면에 전기 히터를 부착하였다. 길이 4 m, 외경 3 mm의 전기저항식 히터를 히트 파이프 표면 끝부분에서 중심부 원형관 바로 앞까지 부착한 뒤, 300℃ 까지 견딜 수 있는 7 mm 두께의 단열재로 단열한 후, 20 mm 두께의 단열재로 추가 단열하였다. 공급 열부하의 조절을 위해 전압조절기(transformer)와 열량계(power meter)를 이용하여 입력량을 확인, 조절하였다.

응축부의 냉각은 팬을 이용하여 일정속도의 공기를 풍동을 통해 공급, 냉각하였다.

2.3 작동유체

작동유체로는 수소저장합금의 흡·탈장과정시 온도를 감안하여 R-134a, R-22, R-142b, Ethanol로 다양화하여 각각의 열전달특성을 파악하였다. 작동유체의 충전량은 전체 히트 파이프 내부체적의 40%로 동일시하였다.

2.4 온도측정위치

온도측정을 위하여 T-type의 열전대를 히트 파이프 표면에 부착하였다. 온도는 동일 축방향으로 응축부 3곳, 증발부 3곳, 중심부 원형관 1곳의 온도를 측정하였다. 측정간격은 양쪽 끝에서 65 mm 간격으로 동일하게 하였다.

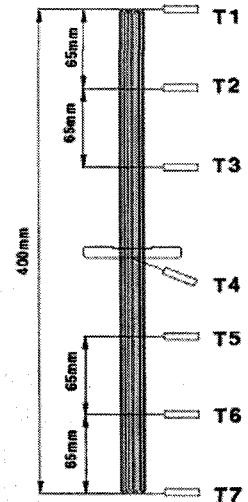


Fig. 3 Location of thermocouples.

2.5 실험방법

히트 파이프의 성능 평가는 응축부에서 일정풍속의 공기를 통해 냉각시키고, 증발부에서 전기히터를 통해 열량을 공급하였다. 공급 열유속 q 의 변화(2, 4, 6, 8 kW/m^2)에 따른 히트 파이프의 온도분포를 측정하여, 시간 및 공급열량에 따른 각각의 작동유체에서의 열전달성능을 파악하였다. 측정주기는 7지점의 온도가 대부분 안정상태에 이르는 정도인 20분을 주기로 실험하였고, 초기 공급열량을 2 kW/m^2 로 시작하여 20분 후, 2 kW/m^2 씩 열량을 증가시켰다. 온도 데이터는 2초 간격으로 측정하여 열전달 성능을 파악하였다. 또한, 열화상카메라를 이용하여 공급 열유속에 따른 온도가 안정화되었을 때 응축부의 온도분포를 측정하였다.

3. 실험결과

히트 파이프의 열전달 성능 확인 및 작동유체의 평가는 각각의 작동유체에 따라 열유속을 변화시켜 7부분의 온도를 2초 간격으로 측정하여, 히트 파이프의 열전달 특성을 파악하였다. 시간에 따른 히트 파이프의 표면온도와 증발부의 공급열량에 따른 응축부의 온도분포, 축방향 양 끝단의 온도 차이를 냉매별로 비교분석하였다.

3.1 시간에 따른 표면온도 변화

Fig. 4 ~ Fig. 7은 각각의 작동유체에 따른 히트 파이프의 표면온도변화를 보여주고 있다. 열유속은 식(1)과 같이, 히터에서 공급되는 열량을 히트 파이프 접촉 표면적으로 나누어 계산하였다.

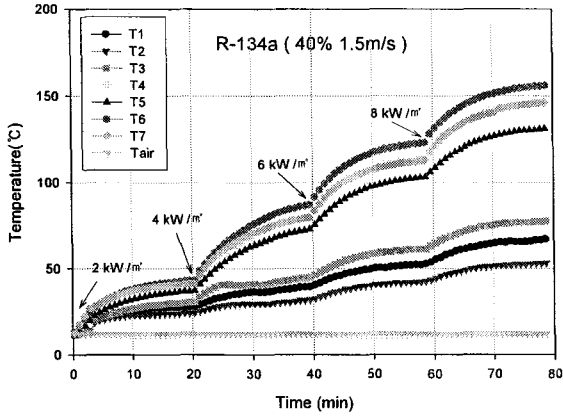


Fig. 4 Temperature of the heat pipe using R-134a.

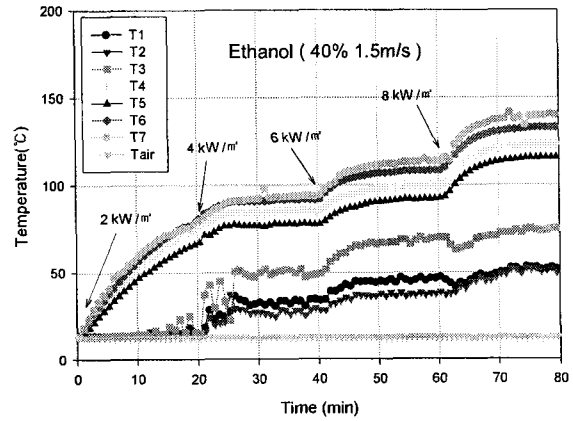


Fig. 7 Temperature of the heat pipe using Ethanol.

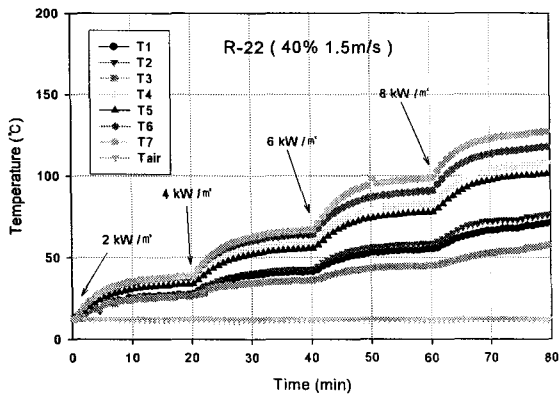


Fig. 5 Temperature of the heat pipe using R-22.

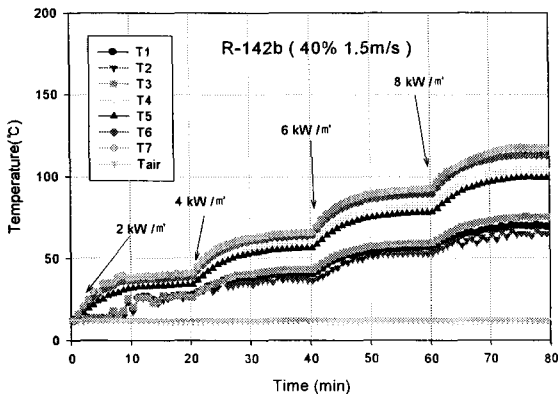


Fig. 6 Temperature of the heat pipe using R-142b.

R-134a의 경우 처음 2 kW/m^2 의 열유속을 주었을 때는 응축부와 증발부의 온도차가 크게 나지 않지만, 4 kW/m^2 의 열유속을 주고 20분이 경과한 뒤 증발부 최대온도와 응축부 최저온도 차이가 50°C 이상 나는 것을 확인할 수 있다. 마지막 8 kW/m^2 의 경우, 증발부 최대온도와 응축부 최저온도가 100°C 정도의 차이를 보였다. R-22와 R-142b는 R-134a에 비하여 응축부와 증발부의 온도차가 적었으며, 열유속에 따른 온도의 변화율도 비교적 일정하게 나타났다. 특히, R-142b의 경우 증발부(T5, T6, T7)와 응축부(T1, T2, T3) 각각의 온도차가 크지 않아, 열전달 형태가 단순 표면전도가 아니라 작동유체에 의한 열전달이 크게 작용한다는 것을 알 수 있다. Ethanol의 경우는 2 kW/m^2 의 열유속을 주었을 때는 히트 파이프의 열전달이 전혀 이루어지지 않았고, 열유속의 증가에 따라 응축부의 온도가 상승하기는 하나 응축부 내에서의 온도차가 심한 것으로 보아, 작동유체에 의한 영향보다는 히트 파이프 표면 열전도에 의한 영향으로 판단된다.

3.2 열저항 및 축방향 온도차

Fig. 8은 각각의 작동유체에 따른 히트 파이프의 열저항을 나타내고 있다. 열저항은 응축부와 증발부 각각의 평균온도를 기준으로 식(2)에 의해 계산되었다.

$$q = \frac{Q}{A} \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

$$R = \frac{T_{eva} - T_{cond}}{Q} \quad (2)$$

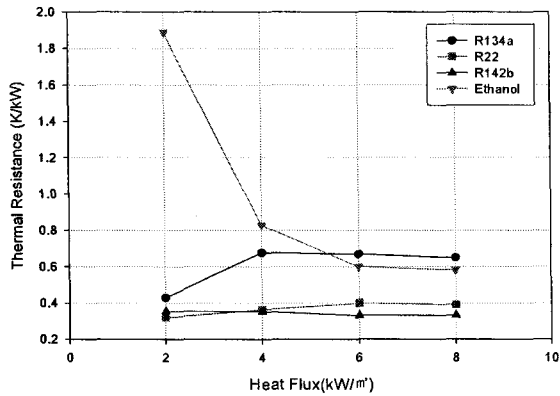


Fig. 8 Comparison with thermal resistance according to working fluid.

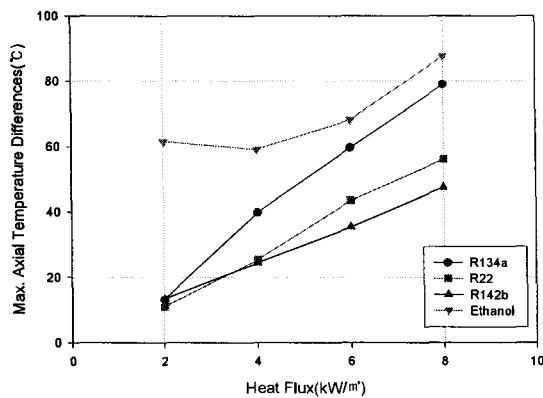


Fig. 9 Comparison with maximum axial temperature differences.

여기서, T_{eva} 와 T_{cond} 는 각각 증발부와 응축부의 평균온도를 나타낸다. Ethanol의 경우, 2 kW/m²의 열유속을 공급했을 때 히트 파이프에 의한 열전달이 나타나지 않아 열저항이 커졌다가, 4 kW/m²의 이상의 열유속을 공급하면서 전도 및 작동유체의 열전달로 열저항이 낮아지는 것을 볼 수가 있다. R-134a의 경우, 2 kW/m²의 열유속을 공급했을 때는 R-142b나 R-22와 큰 차이를 보이지 않다가, 4 kW/m² 이상으로 열유속이 높아지면서 공급열량을 원활히 전달시키지 못하여 열저항이 커지는 것으로 나타났다. R-142b와 R-22의 경우는 앞의 작동유체에 비해 열유속에 의한 열저항의 변화가 뚜렷이 나타나지 않았고, 평균 열저항 또한 R-134a나 Ethanol에 비하여 매우 낮았다.

Fig. 9는 히트 파이프 축방향의 양 끝(T1, T7)의 온도차를 보여주고 있다. Ethanol의 경우 히

트 파이프의 열전달이 표면 열전도에 의해 대부분 이루어져 양 끝단의 온도차이가 크게 나타났으며, R-134a는 4 kW/m² 이상으로 열유속이 상승하면서 축방향 온도차도 큰 상승폭을 보였다. R-22와 R-142b의 경우는 열유속의 상승으로 인한 히트 파이프의 온도차가 앞서 두 작동유체에 비해 낮은 것으로 나타났다. 특히, 열유속이 상승함에 따라 앞서 두 작동유체와의 차이가 더욱 커지는 것으로 작동유체에 의한 열전달 성능이 R-134a나 Ethanol에 비해 뛰어난 것을 알 수 있었다.

4. 결론

(1) 각각의 작동유체에 따른 온도비교

R-134a의 경우 4 kW/m² 이상의 열유속을 주었을 때 증발부와 응축부의 온도차가 크게 나타났고, R-22와 R-142b는 R-134a에 비하여 응축부와 증발부의 온도차이가 적었으며, 열유속에 따른 온도의 변화율도 일정하게 증가하는 경향을 보였다. Ethanol의 경우는 열유속의 증가에 따라 응축부의 온도가 상승하기는 하나 응축부 내에서 히트 파이프의 표면 열전도에 의한 영향으로 온도차가 크게 나타났다.

(2) 열저항 비교

R-134a의 경우 4 kW/m² 이상에서 높은 열저항을 보였고, Ethanol은 2 kW/m²에서 높은 열저항을 보이다가, 열유속의 상승에 따른 히트 파이프의 열전도량 상승으로 열저항이 점차 감소하였으며, R-22와 R-142b는 앞의 두 유체에 비해 낮은 열저항을 보였고, 열유속의 변화에 따른 영향도 비교적 적게 나타났다.

4종류의 작동유체를 비교한 결과, R-22와 R-142b가 열전달성능이 뛰어난 것으로 나타났고, 이후 수소저장용기의 적용에 적합할 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Suda Sei, J. Chemical Engineering, Vol. 5, 1983, p. 29.
2. E. Tuscher, P. Weinzierl, and O. J. Eder, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 3, 1983, p. 199.
3. Kim C. J., Kim D. R., J. Korea Hydrogen

- Energy Society, Vol. 10, 1999, p. 81.
4. M. Groll, W. Supper, U. Mayer, and O. Brost, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, 1987, p. 89.
 5. Sim K. S., Myung K. S., Kim J. D., and Kim J. W., Trans. of the Korea Hydrogen Energy Society, Vol. 13, 2002, p. 97.
 6. P. Muthukumar, M. Praksh Maiya, S. Srinivasa Murthy, Int. J. Hydrogen Energy, Vol 30, 2005, p. 1581.