

스테인리스 스틸-나트륨 히트파이프의 장기 수명 시험

박수용[†]·정의국^{*}·부준홍^{**}·강환국^{***}·유정현^{***}·박상훈^{***}

Long-Term Life Test of A Stainless Steel-Sodium Heat Pipe

Park, S.Y., Jung, E.G., Boo, J.H., Kang, H.K. Yoo, J.H., and Park, S.H.

Key Words: Stainless steel-sodium heat pipe(스테인리스 스틸-나트륨 히트파이프), Long Life Test(장기 수명 시험), Liquid metal(액체 금속)

Abstract

High-temperature cylindrical stainless steel/sodium heat pipe was manufactured and tested under long-term operation. The container material was stainless steel 316L and the working fluid was sodium. The heat pipe was 25.4 mm in diameter and 1000 mm in length with a two-layer screen mesh wick. The evaporator part was 600 mm and the condenser part was 300 mm in length. Total measurement points on heat pipe were 15 points and 12 points were located in condenser part. The heat pipe was heated for 142 days(3400 hours) at 800°C. In the test period, the maximum temperature difference was increased from 18°C to 28°C and the maximum thermal resistance was as low as 0.015°C/W.

기호설명

Ta (단열부 온도, °C)

Tc (응축부 온도, °C)

1. 서론

히트파이프는 상변화를 이용하는 높은 열전달 특성과 별도의 동력을 필요로 하지 않는 특징들로 인해 초기에는 우주 분야에서의 적용을 목적으로 개발되었으나, 현재에는 전자 통신 및 에너

지 분야에서 다양하게 응용되고 있다. 특히 고온 범위 히트파이프는 450°C 이상의 작동 온도범위를 포함하며, 나트륨, 칼륨, 세슘 등과 같은 액체 금속을 작동 유체로 사용한다(1). 초기의 액체 금속 히트파이프는 열이온 액-전기 발전 장치의 열 전달을 위해 개발되었으나, 현재는 Dish/Stirling 엔진, 극초음속 항공기의 앞전(leading edge) 냉각, 핵융합을 이용하는 로켓 엔진의 열전달 모듈, 다양한 성형 공정, 그리고 고온 열교환기 등에 사용되고 있다(2-7).

이러한 고온 히트파이프에 대해서는 용기와 작동 유체의 적합성, 작동 특성 및 작동 한계, 다양한 형상에 대한 연구들이 진행되었으며, 적용 장비의 장기 작동을 위한 히트파이프의 수명 보장과 이를 통한 신뢰성 획득이 중요한 연구 주제가 되었다(8,9). 특히 히트파이프의 작동 수명 예측은 많은 응용 연구자들에게 관심의 대상이 되었으며, 저온 범위 히트파이프에 대해 Baker가 수행한 가속 수명시험과 Arrhenius 모델(10)을 통한 해석 방

[†] 한국항공대학교 대학원

E-mail : sypark@mail.hankong.ac.kr

TEL : (02)300-0053 FAX : (02)3158-4429

* 한국항공대학교 대학원

** 한국항공대학교

*** (주)대흥기업

법이 보편적인 수명 예측 방법으로 이용되고 있다. 국내에서도 저온 범위인 구리-물 조합의 히트파이프에 대한 수명 예측은 신흥태 등에 의해 수행⁽¹¹⁾되었으며, 이는 브라운이 제안한 모델을 이용한 수명 예측 방법을 따랐다.

국내에서 수행된 액체 금속 히트파이프에 대한 연구는 유리 성형 공정 및 고온 열원에 응용할 목적으로 특정 형태에 대한 작동 성능 연구가 수행되었으며⁽¹²⁾, 파이프 형태의 히트파이프에 대한 시동 및 작동 특성에 관한 연구가 이루어졌다⁽¹³⁾. 이후 이러한 연구 결과를 바탕으로 고온 폐열회수 시스템에 고온 범위 히트파이프를 적용할 수 있는 열교환기의 기초 설계 프로그램의 개발이 진행되었다⁽¹⁴⁾. 그러나 용기와 작동 유체와의 적합성 및 제작 방법을 검증할 수 있는 장기 수명 시험에 대한 연구는 부족하였으며 외국의 문헌이나 연구 결과를 검토함으로써 그 결과를 추정하여 왔다.

본 연구는 고온 폐열 회수 열교환기에 적용할 목적으로 설계/제작된 스테인리스 스틸-나트륨 조합의 액체 금속 히트파이프에 대한 수명 시험을 수행하고 결과를 검토함으로써 고온 범위 액체 금속 히트파이프의 대량 생산을 위해 시도된 제작 방법에 대해 검증하고, 열교환기의 장기 작동에 대해 신뢰성을 부여할 목적으로 수행되었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 히트파이프

본 실험을 위한 히트파이프는 고온 폐열 회수 열교환기에 적용할 목적으로 제작되었다. 길이와 외경은 각각 1 m와 25.4 mm이고 스테인리스 스틸 316L 파이프를 이용하였다. 파이프의 내경은 22.1

mm이며, 내부에는 메쉬 번호 #50인 스테인리스 스틸 재질의 스크린 메쉬를 두 겹 삽입하여 워 구조물로 이용하였다. 파이프의 한쪽 끝은 동일 재질의 마개를 용접하였으며, 다른 한쪽은 주입관 (filling tube)을 부착하여 작동 유체를 주입한 후 용접하였다. 히트파이프의 작동 유체로는 나트륨 (sodium)을 사용하였으며, 순도 99.4%의 상업용 나트륨을 정제한 후 주입하였다. 히트파이프는 증발부 600 mm, 단열부 100 mm, 그리고 응축부는 300 mm가 되도록 제작하였다. 실제 고온 폐열 회수 열교환기에 적용할 히트파이프는 전열 면적의 확대를 위해 원형 흰(fin)을 부착하였으나, 장기 수명 시험을 위해서는 흰을 부착하지 않은 모델을 이용하였다. 히트파이프는 (주)대흥기업에서 제작하였으며, 동일한 형태와 방법으로 3개의 히트파이프를 제작/이용하였다.

2.2 히터

히트파이프의 열원으로 사용하기 위해 두 개의 반원형 세라믹 노(furnace)를 결합하여 전기 저항식 중공 고온 노를 별도로 제작하였다. 노의 길이는 600 mm이고, 중심에는 파이프를 삽입할 수 있도록 30 mm의 구멍이 뚫어져 있다. 히터의 공급 열부하는 전압조절기를 통하여 조절할 수 있게 하였으며, 단열부의 온도를 기준으로 공급 열부하를 조절하였다.

2.3 기타 실험 장치

Fig. 1은 히트파이프에 부착한 열전대의 위치를 보이고 있다. 열전대는 증발부에 2개와 단열부에 1개를 부착하였고, 단열부에 부착한 열전대의 정보를 이용하여 히트파이프 작동 온도를 판단하였다. 응축부에는 12개의 열전대를 부착하였는데, 응축부 끝단에서 5 mm 간격으로 부착하여 히트

(Units : mm)

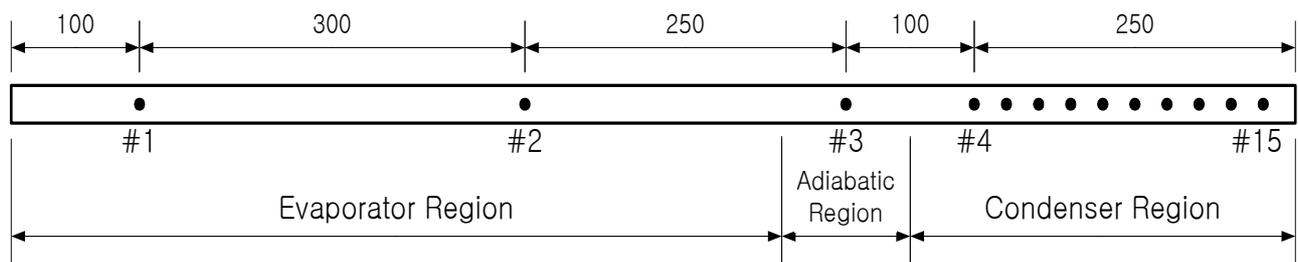


Fig. 1 Thermocouple locations

파이프 끝단에서의 온도 강하를 관찰하였다.

2.4 실험 방법

실험은 고온 폐열 회수 열교환기 작동 온도를 고려하여 가속 수명 시험을 수행한 후 시간에 따라 측정된 온도를 단열부와 온도차를 측정하는 방법으로 진행되었다. 히트파이프의 작동 온도는 히트파이프를 적용할 고온 폐열회수 시스템의 작동 온도를 고려하여 1000℃, 900℃, 그리고 800℃를 선정하였으며, 이에 대해 수명 시험을 수행하였다. 온도는 1주에서 2주 간격으로 측정되었고, 단열부와 온도차를 기록하였다.

3. 실험 결과 및 토의

Fig. 2는 고온 히트파이프를 단열부 온도 기준 800℃로 작동하였을 때 응축부와 단열부 모습을 보인 것이다. 히트파이프가 응축부 끝단까지 붉은색을 나타내며 정상적으로 작동하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 히트파이프가 고온 부식에 의해 파괴된 모습을 보이고 있다. 문헌에 의하면 스테인리



Fig. 2 Heat Pipe Test



Fig. 3 Cracking as High Temperature Corrosion

스 스틸 316L은 850℃ 이상에서 장기간 작동하였을 때 고온 부식에 의한 스케일링(scaling)이 급격히 발생한다⁽¹⁵⁾. 작동 온도 1000℃와 900℃의 히트파이프 표면에서는 스케일링 현상이 급격히 발생하였으며, 작동 후 1 주일이 경과 되었을 때 900℃에서 작동하던 히트파이프의 증발부에서 그림과 같은 크래킹(Cracking)이 나타났고, 이후 안전을 위해 작동 온도 1000℃인 경우와 함께 실험을 중단하였다.

히트파이프의 작동 온도를 800℃로 유지한 경우, 히트파이프의 표면에 얇은 산화막이 형성되었으며, 고온 부식을 발생하지 않았다. 이후 실험이 5개월 이상 진행되었으나, 900℃ 이상의 온도에서 나타난 부식 현상은 관찰되지 않았다.

Fig. 4는 히트파이프의 길이 방향 온도 분포의 변화를 보인 것인데, 약 5개월을 실험하여 1개월 단위로 온도 변화를 나타낸 것이다. #3번 열전대는 단열부의 온도를 나타내는데, 800℃로 고정한 것을 볼 수 있다. 증발부의 온도는 810℃정도를 나타내고 있으며, 이는 실험이 진행되는 동안 큰 변화 없이 유지되었다. 단열부의 온도는 증발부 끝단으로부터 650 mm 위치의 온도를 측정하여 이용하였는데, 응축부 끝단의 온도와는 최대 20℃ 정도의 온도차를 보였다. 이를 열저항으로 나타내면 히트파이프에 공급한 열부하가 2150 W인 것을 고려하였을 때 최대 0.015 ℃/W 정도의 열저항을 보인 것이다.

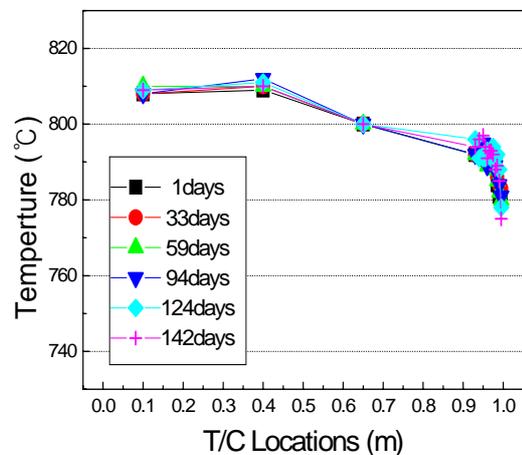


Fig. 4 Temperature distribution at operation temperature of 800℃

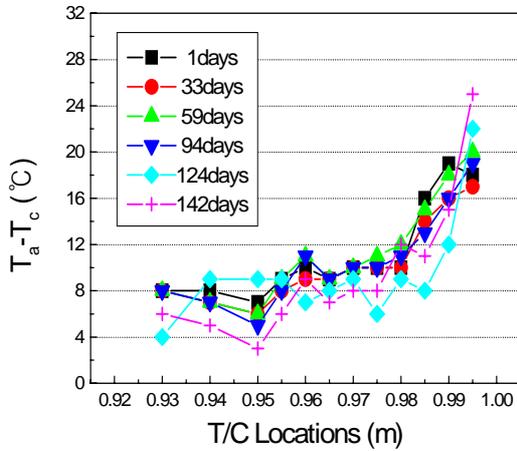


Fig. 5 Temperature differences at operation temperature of 800 °C

Fig. 5와 Table 1은 800 °C인 단열부의 온도를 기준으로 응축부 온도와의 차이를 각 위치에 따라 그래프와 표로 나타낸 것이다. 처음 실험을 시작하였을 때 히트파이프의 단열부와 응축부의 최대 온도차는 18 °C를 보였으나, 이후 온도차는 142 일째 25 °C까지 상승하였다. 그리고 히트파이프 끝단의 온도차가 작동 시간이 증가함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있는데, 990 mm와 995 mm 위치에서의 온도차가 상대적으로 크다. 그러나 970 mm 위치까지는 변화량이 크지 않지만 이후 상대적으로 큰 변화를 보인다.

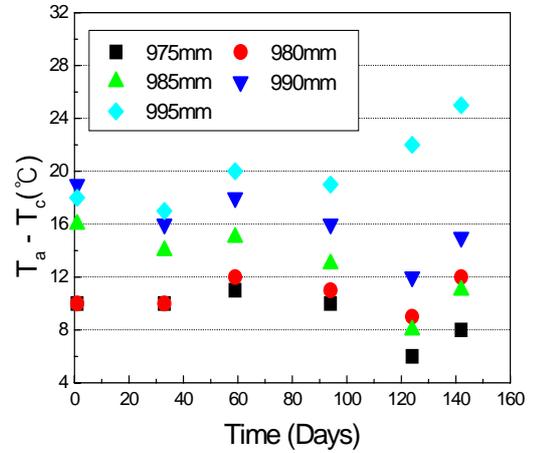


Fig. 6 Variation of temperature differences at operation temperature of 800 °C

Fig. 6은 975 mm에서 끝단까지 5개의 열전대 온도의 변화 추이를 시간에 따라 보이고 있다. 온도차는 가장 끝단인 995 mm를 제외하고 단열부에서 가까운 순서대로 낮게 나타났으며, 전체 측정 기간에 걸쳐 큰 차이를 보이지 않았다. 특히 985 mm 위치까지는 16 °C 정도의 온도차를 보였으며, 시간 증가에 따른 변화가 상대적으로 크지 않았다. 다만 995 mm 위치에서의 온도차가 90일(2160시간) 정도가 지나면서 상승하기 시작하였으며, 최대 25 °C까지 상승하였다.

Table 1 Temperature differences (Ta - Tc)

| Days \ T/C | 1 | 33 | 59 | 94 | 124 | 142 |
|------------|----|----|----|----|-----|-----|
| 930mm | 8 | 8 | 8 | 8 | 4 | 6 |
| 940mm | 8 | 7 | 7 | 7 | 9 | 5 |
| 950mm | 7 | 6 | 6 | 5 | 9 | 3 |
| 955mm | 9 | 8 | 9 | 8 | 9 | 6 |
| 960mm | 10 | 9 | 11 | 11 | 7 | 9 |
| 965mm | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 7 |
| 970mm | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 |
| 975mm | 10 | 10 | 11 | 10 | 6 | 8 |
| 980mm | 10 | 10 | 12 | 11 | 9 | 12 |
| 985mm | 16 | 14 | 15 | 13 | 8 | 11 |
| 990mm | 19 | 16 | 18 | 16 | 12 | 15 |
| 995mm | 18 | 17 | 20 | 19 | 22 | 25 |

4. 결론

고온 폐열 회수 열교환기에 적용하기 위한 스테인리스 스틸-소듐 조합의 히트파이프에 대한 장기 작동 시험을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스테인리스 스틸 316L의 고온 산화를 고려하였을 때, 히트파이프를 작동 온도 850 °C 이상으로 유지하는 것은 용기에서의 급속한 스케일링을 발생시켜 위험할 수 있다. 그러나 히트파이프 작동 온도 800 °C에서는 142일(3400시간) 이상 작동하였을 때에도 용기 표면에서 우려할 만한 산화가 관찰되지 않았다.

(2) 히트파이프의 작동 온도와 응축부와의 온도차는 가장 끝단인 995 mm 위치에서 가장 큰 온

도 변화가 나타났으며, 초기 18℃에서 142일이 지난 후 25℃로 약 7℃의 온도 상승이 나타났다.

(3) 현재까지의 장기 작동 결과 응축부 끝단에서 히트파이프의 작동을 막는 큰 온도 강하는 관찰되지 않았으며, 액체 금속 히트파이프의 제작 방법에 대해 일정 정도의 신뢰가 가능하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 에너지절약기술개발사업(2002-E-ID01-P-03-3-010-2004)에 의해 지원되었으며, 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) Peterson, G.P., 1994, An Introduction to Heat Pipes, John Willey & Son, Inc., pp.112-150.
- (2) Zhuang, J., Yang, J., Wang, R., Chen, X.Y., Li, X.J. and Li, L., 1995, Development of liquid-metal heat pipe heat exchanger, 9th International Heat Pipe Conference, pp.7-17.
- (3) www.lanl.gov/orgs/esa/epe/Heat_Pipe_Site/heatpipe4.html
- (4) www.isotech.co.uk/primary/heatpipe.html
- (5) Cowell, G.T. and Modlin, J.M., 1992, Heat pipe and surface mass transfer cooling of hypersonic vehicle structures, J. of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.6, No.3, pp. 492-499.
- (6) Dunn, P.D. and Reay, D.A., 1993, Heat Pipes, Pergamon, 4th ed., pp.297-299.
- (7) Laing, D., Reusch, M. and Brost, O., 1997, "Hybrid Sodium Heat Pipe Receiver for Dish/Stirling System," 10th IHPC, pp.65-69.
- (8) Jang, J.H., 1995, "Start-up Characteristics of a Potassium Heat Pipe from the Frozen State," J. of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.9, No.1, pp.117-122.
- (9) Matsumoto, S. and Yamamoto, T., 1997, "Heat Transfer Characteristic Change and Mass Transfer under Long-Term Operation in Sodium heat Pipe," 10th International Heat Pipe Conference, I-4.
- (10) Baker, E., 1973, "Prediction of Long-Term Heat Pipe Performance from Accelerated Life Tests," AIAA Journal, Vol.11, No.9, pp.1345-1347.
- (11) 신흥태, Polasek, F., 이윤표, 2002, "온도 측정에 의한 히트파이프의 수명 예측," 대한기계학회 논문집 B권, 제23권 제7호, pp. 1622-1629.
- (12) 박수용, 부준홍, 김준범, 2002, "고온 유리성형 공정을 위한 직육면체형 Sodium 히트파이프의 실험 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제26권 제 11호, pp. 1622-1629.
- (13) 박수용, 부준홍, 2004, "고온 원관형 히트파이프의 열전달 특성에 관한 실험 연구," 대한설비공학회 논문집, 제16권, 제1호, pp. 70-76.
- (14) 정의국, 박수용, 부준홍, 2004, "고온 범위 히트파이프 열교환기 성능 해석과 모사," 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, P881-886.
- (15) Davis, J.R., 1994, ASM Specialty Handbook - Stainless Steels, The materials Information Society, pp.205-228.