

온도측정에 의한 히트파이프의 수명예측

신흥태* · F. Polásek** · 이윤표*
(1998년 11월 25일 접수)

Prediction of Life of Heat Pipes by Measuring Temperature Distribution

Hung Tae Shin, František Polásek and Yoon Pyo Lee

Key Words: Life Test (수명시험), Compatibility (적합성), Non-Condensable Gas (불용축가스), Methanol-Stainless Steel Heat Pipe (메탄올-스텐레스강 히트파이프)

Abstract

The thermal performance degradation of heat pipes is caused by the non-condensable gas generation mainly due to the electrochemical corrosion which results from the reaction of working fluids with tube materials. In this study, a simplified method described below was proposed to estimate the life of heat pipes concerning the non-condensable gas generation. The temperature distributions at the outer surface of heat pipes was measured, and based on them the amount of non-condensable gas of hydrogen was estimated. Applying it to the Arrhenius model, the mass generation of hydrogen and the volume occupied by the gas in heat pipes could be estimated for an operating temperature and time. Moreover, this simplified method was applied to the accelerated life test of nine methanol-stainless steel heat pipe samples.

기호설명

- A : 반응 활성화에너지, J
- F : 용담인자 (shift factor)
- k : Boltzmann 상수 ($=1.38 \times 10^{-23}$ J/K)
- m : 수소가스 발생량, kg
- ṁ : 수소가스 발생률, kg/s
- P_h : 용축부 비활동영역에서의 수소가스 분압 ($=P_v - P_{vi}$), kPa
- P_v : 용축부 활동영역에서의 메탄올증기 포화압력, kPa
- P_{vi} : 용축부 비활동영역에서의 메탄올 증기분압, kPa
- R_h : 수소가스 기체상수 ($=4.12$ kJ/kgK)
- T : 온도, K
- T_h : 용축부 비활동영역에서의 수소가스 온도, K
- T_v : 용축부 활동영역에서의 메탄올증기 온도 혹은

작동온도, K

- T_{vi} : 용축부 비활동영역에서의 메탄올증기 온도 ($=T_h$), K
- V_h : 수소가스 점유체적, m³
- V_t : 히트파이프 전체체적, m³
- τ : 시간, days

1. 서론

열제어 및 에너지 유효이용을 위해 작은 온도 차로 다량의 열을 고온부에서 저온부로 수송할 수 있는 열수송 기기인 히트파이프는 1940년대 최초로 등록된 이래 상품화와 더불어 매우 다양한 분야에 적용되고 있다. 초기에는 인공위성, 우주선 등의 열제어에 사용되었으며 현재는 전자장비로부터의 방열, 금형의 냉각, 공조 및 폐열회수 열교환기 등에도 널리 사용되고 있다.

히트파이프는 잠열수송으로 인해 열전달 성능이 우수할 뿐만 아니라 표면온도가 균일하고 반응속도가 빠르며 가동부를 필요로 하지 않는 것 등

* 회원, 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

** Energy Services (CZECH Republic)

의 많은 장점을 지니고 있다. 따라서 향후 이용 분야는 더욱 확대될 것으로 전망된다.

한편 히트파이프는 작동유체의 증발·응축이 밀폐관내에서 일어나므로 히트파이프 성능은 부식 및 튜브내의 불용축 가스의 발생으로 인하여 시간에 따라 항상 일정하게 유지되지 않는다는 단점이 있다. 예를들어 물-강관 및 메탄올-강관 히트파이프의 성능은 불용축 가스인 수소가 주로 관내부에서 화학적 부식에 기인하여 발생하게 된다.

이러한 불용축 가스는 응축부에 축적되며 점차 불투과되는데 이는 가스 및 증기의 경계면에서 급격한 온도강하로 나타난다. 일반적으로 가스의 발생은 히트파이프 성능저하의 주된 원인이 된다. 발생하는 가스량이 아주 소량이라 할지라도 이로인해 히트파이프 성능이 심각하게 저하될 수 있다.

따라서 보다 신뢰성있는 히트파이프의 제작을 위해서 이들의 열적성능이 장기간 안정되도록 하는 다양한 히트파이프의 제조방법이 강구되고 있으며 관재질 및 작동액체간의 적합성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재까지 많은 히트파이프 제작회사들과 연구기관들은 물-강관 히트파이프의 수명실험을 수행해 왔으며 많은 실험데이터가 발표되어 왔다.⁽¹⁻⁶⁾ 그 중 어떤 실험데이터는 이들 조합이 어느 정도 적합하다고 하며, 다른 데이터는 적합하지 않다고 하기도 한다. 이것은 재료처리가 다르고 상이한 기술로 제작된 히트파이프는 결과적으로 부식, 가스발생 특성에 있어서 서로 다르게 나타나기 때문이다. 그러므로 동일한 세정방법, 동일한 조립과정에 따라 제작된 히트파이프의 가스발생 특성데이터를 얻는 것이 중요하다. 이것이 물-스텐레스강 혹은 메탄올-스텐레스강과 같은 히트파이프의 수명실험을 수행하는 이유이다.

히트파이프 수명은 히트파이프 작동조건에 따라 큰 차이를 보인다. 일반적으로 작동유체 및 관재질이 적합하지 않는 경우는 작동온도가 높을수록 히트파이프 수명이 감축된다. 따라서 낮은 온도에서 작동하는 히트파이프 수명을 시험하는데 걸리는 시간은 높은 온도에서 작동하는 경우보다 훨씬 길어진다. 그러므로 저온에서의 수명 시험에는 많은 시간 및 경제적 투자가 요구된다.

본 연구에서는 히트파이프 수명시험법으로써,

실제 사용온도보다 가혹한 조건인 고온에서 히트파이프를 작동시켜 히트파이프내 수소가스 발생량을 단기간의 실험을 통해 평가하고 이를 바탕으로 실제 사용온도인 저온에서 작동시켰을 때의 수명을 예측하는 가속 수명시험법을 사용하였다.

또한 히트파이프 내부에서 발생하는 수소가스량을 예측하는 데는 Arrhenius model⁽⁴⁾을 사용하였으며 이를 근거로 하여 히트파이프의 제작에 대해 수소가스가 점유하는 체적비를 산출하였다. 이러한 계산에는 단지 히트파이프 온도분포 데이터만이 이용되었다.

이와같은 히트파이프 간이 수명평가법은 히트파이프의 표면온도 분포측정만을 통해 수명평가를 수행할 수 있으므로 실제 히트파이프 제작자가 용이하게 적용할 수 있으리라 생각된다. 본 연구에서는 간이 수명평가의 구체적인 방법을 메탄올이 작동액체의 대부분을 차지하는 스텐레스강 히트파이프에 적용하였다.

2. 관재료 및 작동액체의 반응

2.1 물-강관의 반응

물 혹은 메탄올로 충전되어 있는 강관 히트파이프의 성능은 불용축 가스가 화학적 부식으로 인해 관내에서 생성되므로 시간에 따라서 일정하지 않다. 화학적 부식 이외에도 관벽으로부터의 가스분리, 관벽을 통한 외부로부터의 가스확산, 그리고 작동유체 증기의 열적 해리 등을 통해 불용축가스가 발생한다.

생성되는 가스량은 관재료, 작동유체의 특성 및 작동온도에 따라 다르다. 강관 혹은 철은 물과 열역학적으로 불안정한 시스템으로써 자발적으로 자유에너지를 변화시켜 철을 이온, 산화물 및 수산화물로 변환시킨다. 물속에서의 강관의 중성 혹은 약 알칼리반응으로 일어나는 전자화학적 부식은 다음과 같은 기본 식으로 나타낼 수 있다.^(1,2)

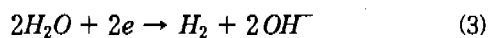
양극 반응 :



음극 반응 :



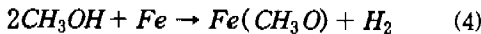
혹은



위의 식에서 알 수 있듯이 일반적으로 물과 강관은 반응하여 수소를 발생시키므로 결과적으로 이들 조합은 히트파이프로 적합하다고 하기 어렵다. 따라서 강관의 내벽에 부식방지용 보호막을 입힌 물-강관 히트파이프를 사용하기도 한다. 이와 유사한 반응이 메탄올-강관 히트파이프에서도 일어난다.

2.2 메탄올-강관의 반응

메탄올과 강관간의 화학적 반응식은 다음과 같다.



메탄올과 강관은 일반적으로 쉽게 반응이 일어나지 않는다고 알려져 있다. 그러므로 참고문헌 [7]에서 나타낸 것 같이 메탄올-스텐레스강은 히트파이프 조합으로 적합할 가능성이 높다. 그러나 히트파이프내 작동액체는 밀폐공간에서 증발·응축을 반복하게 되므로 극미량의 수소가스가 발생한다 하더라도 성능에 크게 영향을 줄 수 있다. 그러므로 참고문헌 [8]에서 나타낸 것처럼 이들 조합은 적합하지 않을 수 있을 것이다.

따라서 메탄올-스텐레스강 히트파이프의 수명 시험을 통해 수소가스 발생에 관한 검토가 필요하다고 생각된다. 본 연구에서는 메탄올-스텐레스강 히트파이프를 수명시험 대상으로 하였다.

3. 히트파이프의 수명시험 방법제안

실제 작동조건하에서 장기간 수명시험을 수행할 경우 많은 시간과 경제적 부자가 필요하다. 그러나 Baker⁽⁴⁾는 작동온도가 불용축 가스발생에 미치는 영향을 검토함으로써 히트파이프에 대한 단시간의 가속시험 결과로부터 장기간에 걸친 수명을 예측할 것을 제안하였다. Baker는 부식, 산화 및 확산을 포함하는 활성화과정에 적합한 Arrhenius model을 사용하여 스텐레스강 히트파이프에서 불용축가스인 수소발생에 관하여 정리하였다.

본 연구에서는 위의 방법을 기초로 하여 물-스텐레스강 및 메탄올-스텐레스강 히트파이프에서의 수소발생 예측방법을 다음과 같이 적용할 것을 제안한다.

① 먼저 3가지의 다른 작동온도 조건에서 각 온도에 대해 최소한 3개의 히트파이프 샘플을 실험

대상으로 선정한다. 실험을 통해 각 히트파이프에서 사용시간에 따라 발생하는 수소가스 질량을 계산하여 도식화한다. 이때 수소가스 질량은 측정된 히트파이프의 표면온도로부터 계산할 수 있다. 이에 관해서는 4.2절에서 상술한다.

② 두 번째 단계로써, 발생된 수소가스 질량을 작동시간(τ)x용답인자(F)에 대해 직선으로 나타낼 수 있도록 각 온도에 따라 용답인자(혹은 shift factor)를 결정한다.

Arrhenius 도식에 의해 절대온도의 역수에 대한 용답인자 F(T)의 로그값의 도표는 직선으로 나타낼 수 있다. 이 용답인자는 다음 식과 같이 정의된다.

$$F(T) = C \exp(-A/kT) \quad (5)$$

여기서 C는 상수, A는 반응 활성화에너지[J], k는 Boltzmann 상수($=1.38 \times 10^{-23}$ J/K), T는 절대온도[K]를 나타낸다.

따라서 결정된 F(T)와 식 (5)로부터 C 및 A를 계산할 수 있다. 이로부터 어떤 작동온도에서의 용답인자를 결정할 수 있게 된다.

③ 세 번째 단계로써, 히트파이프내에서 발생하는 수소가스량을 작동시간 및 작동온도에 대한 함수로 나타낸다. 수소발생 정도를 작동시간에 대한 함수 f(τ)와 작동온도에 대한 함수 F(T)의 곱으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{m}(\tau, T) = f(\tau) F(T) \quad (6)$$

여기서 \dot{m} 는 질량발생률 [$\mu\text{g}/\text{day}$], τ 는 시간[day]을 나타낸다.

식 (6)은 수소발생량의 시간(τ)x용답인자(F)에 관한 그래프로부터 계산된다. 이로부터 작동온도 및 작동시간이 주어지면 발생하는 수소가스량이 구해진다.

④ 마지막 단계로써, 히트파이프 내에서 수소가스가 차지하는 체적을 계산한다. 이에 관해서는 4.4절에서 상술한다. 이것은 히트파이프 제작업체에 있어서 중요한 자료가 될 것이다.

위에서 제안한 간이 수명평가 방법의 구체적인 적용절차는 다음과 같다.

4. 수명시험 방법의 구체적 절차

4.1 수명 실험장치

제안한 수명평가법을 적용하는 예로써 다음과 같은 실험을 수행하였다. 실험장치는 Fig. 1과 같

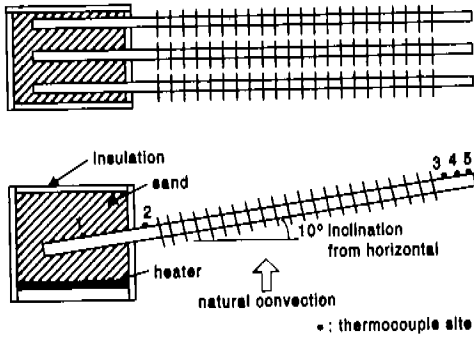


Fig. 1 Diagram of one rig of heat pipes for life test.

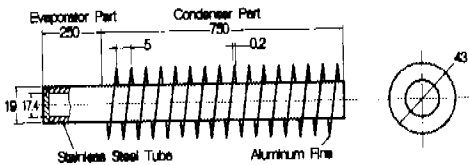


Fig. 2 Diagram and parameters of a finned heat pipe.

다. 시험대상인 히트파이프는 작동유체의 대부분이 매탄올인 스테레스강 써모사이폰으로써, 중발부에는 방열핀이 없으며 용축부에는 핀이 부착되어 있다. 수명실험시 히트파이프 위치는 수평 위치를 기준하여 약 10° 기울어져 있다.

시험대상인 히트파이프는 Fig. 2과 같이 외경이 19mm, 길이가 1000mm 이다.

용축부의 냉각은 자연대류에 의해서 이루어진다. 각 히트파이프에 대해 5개의 열전대가 스테레스강의 바깥표면에 부착되어 있다. 즉, 가열부, 단열부에 각각 1개씩, 용축부의 관끝부분에서 10, 25 및 40mm 떨어진 위치에 각각 1개씩 부착되어 있다.

3개의 히트파이프는 하나의 가열블록에 삽입되어 있으며 3개의 가열블록을 사용하므로 총 9개의 히트파이프를 실험대상으로 하였다. 3개의 가열블록은 작동온도 즉 Fig. 1에서 위치 2의 온도가 각각 60, 80 및 100°C의 온도로 유지되도록 하였다.

가열방식은 모래가열 방식을 사용하였다. 가열

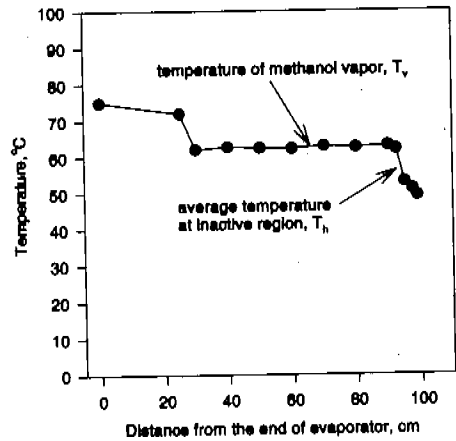


Fig. 3 Example of temperature distribution at total heat pipe surface.

블록 내부에 모래를 가득 채운후 가열블록 하단에 설치된 히터에 전류를 흘려 모래를 가열하였다. 작동온도 조절 즉 가열량 조절에는 슬라이더 스톱을 사용하였다.

약 10일간마다 위에서 언급한 5군데를 포함한 히트파이프 전체에 대한 온도분포를 측정하였다. 측정하고자 하는 각 위치의 히트파이프 표면에 열전대를 일시적으로 접촉시켜 온도를 측정하였다. 히터의 가열량이 가열블록 주위로 방열되는 것을 막기하기 위해 압착된 유리섬유로 가열블록을 단열하였다.

온도데이터는 T형 열전대로부터의 신호를 datalogger (Micrologger 21X)로 전송하고 이를 PC로 수집하였다. 전체 수명평가 시간은 약 40일간이다.

4.2 실험결과

Fig. 3은 작동온도가 60°C일 때 40일 경과한 후 1개의 히트파이프 전체표면 온도분포를 예로 보여준다. 이와같이 약 10일마다 9개의 히트파이프에 대해 측정된 각각의 온도분포로부터 수소가스 발생량을 산출하였는데 그 과정은 다음과 같다.

먼저 Fig. 3은 중발부 끝단을 0cm로 한 그래프로써, 93~100cm 사이의 영역 즉 용축부 끝부분에서 길이방향 온도구배가 큰 영역이 존재함을 알 수 있으며, 이 영역에 수소가스가 축적된다고

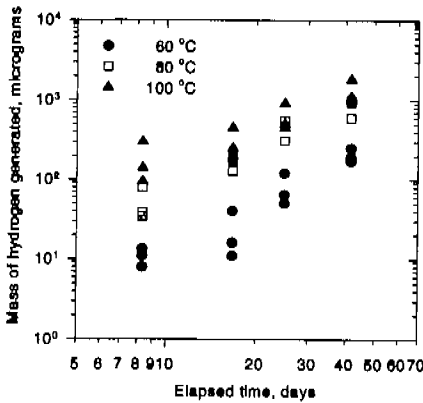


Fig. 4 Hydrogen generation in methanol-stainless steel heat pipes.

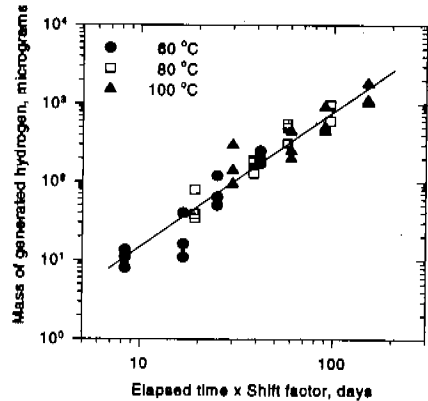


Fig. 5 Universal curve of hydrogen generation data from methanol-stainless steel heat pipes.

판단된다. 본 연구에서는 이러한 영역을 히트파이프의 비활동영역이라 하고, 응축부에서 비활동영역을 제외한 영역을 활동영역이라 한다. 이 비활동영역에는 메탄올의 증기도 함께 혼합해 있을 것이다. 따라서 비활동영역에서의 수소가스 및 증기의 혼합기체 온도는 이 영역의 평균온도로 나타낼 수 있으며, 수소가스 온도 T_h 는 이 평균온도로 간주할 수 있다. T_h 는 비활동영역에서의 증기온도 T_{vi} 와 동일할 것이다. 본 연구에서 측정 한 온도들은 관표면 온도이지만 본 간이평가에서는 이 온도를 그 지점에서의 관내부 온도로 가정한다.

다음으로 응축부 활동영역에서의 메탄올 증기온도 T_v 에 대한 포화압력 P_v 를 계산한다. 응축부 활동영역에서의 증기 포화압력 P_v 는 비활동영역의 기체압력 즉 수소가스 압력 P_h 와 증기분압 P_{vi} 의 합과 동일하다고 할 수 있다. 증기분압 P_{vi} 는 비활동영역에서의 온도 $T_h(=T_{vi})$ 에 대한 포화압력에 해당한다. 따라서 수소가스 압력 P_h 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_h = P_v - P_{vi} \quad (7)$$

또한 수소가스가 차지하는 체적 V_h 는 비활동영역의 체적 즉 길이방향 온도구배가 급격히 증가하기 시작하는 지점으로부터 응축부 끝단까지의 내부체적으로 간주할 수 있다.

그러므로 수소가스 발생량 m 을 다음의 이상기체 상태방정식으로 부터 구할 수 있다.

$$m = \frac{P_h V_h}{R_h T_h} \quad (8)$$

여기서 R_h 는 수소의 기체상수 ($=4.12 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$)이다.

식 (8)에 의해 약 10일마다 9개의 히트파이프 내 수소가스 발생량 m 을 계산하여 실험시간 τ 에 관한 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다.

4.3 수명평가 절차

Fig. 4의 수소가스 발생량을 Fig. 5와 같이 시간(τ)x응답인자(F)에 대해 직선으로 나타낸다. 여기서 응답인자는 작동온도가 60°C인 경우 1로 하고, 80 및 100°C인 경우에는 Fig. 5가 직선이 되도록 각각 시행착오법으로 적절히 선택해야 한다.

이렇게 구한 $F(T)$ 를 Fig. 6과 같이 $1/T \times 1000$ 에 대해 Arrhenius 도식화하면, $\ln F(T)$ 값이 $1/T$ 에 비례함을 알 수 있다. $\ln F(T)$ 는 $1/T \times 10^3$ 에 대해 다음과 같은 1차식으로 나타낼 수 있다.

$$\ln F(T) = -4.03 (1/T \times 10^3) + 12.1 \quad (9)$$

식 (9)와 식 (5)로부터 활성화 에너지 A 를 얻을 수 있으며, $F(T)$ 는 식 (9)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F(T) = 179000 e^{-4030/T} \quad (10)$$

한편 수소가스 발생량은 Fig. 5로부터 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\ln m = 1.74 \ln(\tau \times F) + \ln 0.254 \quad (11)$$

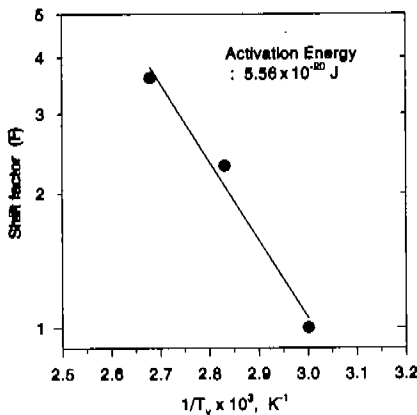


Fig. 6 Arrhenius plot of shift factor.

여기서 경과시간 τ 의 단위는 days 이다.

식 (11)로부터 수소발생량 m 및 발생률 \dot{m} 은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = 0.254 (\tau \times F)^{1.74} \quad (12)$$

$$\dot{m} = 0.441 \tau^{0.74} F^{1.74} \quad (13)$$

따라서 예를들면 작동온도 30℃로 히트파이프를 1년간 사용하였을 경우 발생하는 수소가스량을 계산하고자 할때는 먼저 식 (10)에 $T=30+273.15$ K 를 대입하여 $F=0.301$ 을 얻는다. 이 F 값 및 $\tau=365$ days를 식 (12)에 대입하여 $m=903 \mu\text{g}$ 을 얻을 수 있다. 즉 1년간 0.9 mg 정도의 수소가스가 생성됨을 예측할 수 있다.

4.4 수소가스 점유체적비

앞절까지는 수소가스 발생량으로 히트파이프 수명을 평가하였다. 그런데 히트파이프 제작자 및 사용자의 입장에서 본다면 수소가스량 자체보다는 수소가스로 인해 점유되는 체적, 즉 히트파이프에서 비활동영역의 체적이 시간에 따라 얼마만큼 증가하는가를 알고자 할 것이다.

본 절에서는 실제 히트파이프 수명평가에 필요한 직접적인 인자로서 히트파이프 체적에 대한 수소가스가 차지하는 체적비율을 살펴보고자 한다.

수소가스 점유체적 V_h 의 계산식은 식 (8)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_h = \frac{mR_h T_h}{P_h} \quad (14)$$

여기서 m 은 수소가스 질량으로써 식 (12)로부터 계산되며, R_h 는 수소 기체상수 (=4.12 kJ/kg·K)이다. $T_h(=T_v)$ 는 비활동영역 온도, P_h 는 비활동영역에서의 수소분압으로써 그 계산과정은 다음과 같다.

먼저 T_h 는 작동온도 T_v 에 대한 히트파이프의 응축부 비활동영역 온도으로써, 본 실험에서는 하나의 작동온도에 대해 3개의 히트파이프를 실험 대상으로 하였으므로 히트파이프 3개의 비활동영역 온도의 평균값으로 나타낼 수 있다. 비활동영역 온도의 평균값은 아래식으로 표현할 수 있다.

$$T_h = (T_v - T_a) \exp(-B\tau) + T_a \quad (15)$$

여기서 T_a 는 시험시 주위공기온도[K]이며, B 는 작동온도의 함수이다.

본 실험에서 $T_a=303.16$ K 이었으며 작동온도 T_v 가 60, 80 및 100℃ 일때 작동시간 τ 에 대해 측정된 T_h 를 식 (15)에 대입하면 각각의 작동온도에 대해 $B(T_v)$ 를 계산할 수 있다. 본 실험에서 60, 80 및 100℃의 작동온도에 대한 $B(T_v)$ 는 각각 0.01032, 0.01472 및 0.01570 이었다. 이와 같이 구한 $B(T_v)$ 는 작동온도에 의존하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = b_1 T_v^n + b_2 \quad (16)$$

여기서 b_1, b_2 및 n 은 상수이며, 이들은 각각의 작동온도 T_v 및 $B(T_v)$ 로부터 curve fitting에 의해 계산된다.

본 실험에서 식 (16)은 다음과 같이 표현할 수 있었다.

$$B = 0.0436 T_v^{0.251} - 0.176 \quad (17)$$

따라서 식 (17)을 식 (15)에 대입하여 T_h 를 계산할 수 있으며 이를 실험값과 비교하면 Fig. 7과 같다.

또한 P_h 는 식 (7)과 같이 작동온도 T_v 에 대한 증기의 포화압력 P_v 와, 식 (15)에서 구한 온도 $T_h(=T_v)$ 에 대한 증기의 포화압력 P_v 와의 차로 계산할 수 있다.

이상으로부터 히트파이프의 작동온도 즉 응축부 비활동영역 온도를 60 및 80℃로 한 경우, 사용시간에 대한 수소가스의 체적 V_h 및 히트파이프 내부의 전체체적 V_t 에 대한 수소가스 점유체적비 V_h/V_t 를 구하면 Fig. 8과 같다. 히트파이프를 60 및 80℃로 작동시켰을 때 1년후의 수소가스 발생량은 식 (12)로부터 각각 7.2 및 23mg 이며, 히

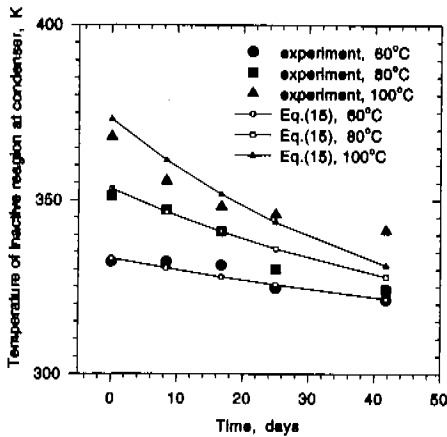


Fig. 7 Comparison between estimated temperature and experimental result of inactive region at condenser.

트파이프 전체체적에 대한 수소가스 점유체적은 Fig. 8로부터 각각 52 및 67%가 됨을 알 수 있다.

4.5 제안한 수명평가 절차의 요약

이상에서 제안한 수명평가절차는 다음의 3단계로 요약할 수 있다.

(1)수소가스 발생량 계산

3가지 작동온도 T_v 에 대해 각각 3개의 히트파이프를 대상으로 삼아, 작동시간 τ 에 따른 히트파이프 표면온도를 추정한다. 이로부터 수소가스 점유체적 V_h , 수소가스온도 T_h 를 계산한다.

중기온도 $T_{vi}(=T_h)$ 에 대한 포화압력 P_{vi} 및 작동온도 T_v 에 대한 포화압력 P_v 로부터 식 (7)에 의해 수소가스분압 P_h 를 계산한다

따라서 수소가스 발생량 m 은 식 (8)에 의해 계산된다.

(2)수소가스 발생량의 Arrhenius 모델화

수소가스 발생량 m 이 작동시간(τ)x용답인자(F)에 대해 직선이 되도록 F를 시형착오법으로 선정하고 이를 식 (5)와 같이 Arrhenius 도식화한다.

따라서 m 은 $\tau x F$ 에 대해 직선으로 나타내었으므로 식 (12)와 같은 형태로 계산된다.

(3)수소가스 점유체적계산

주위온도가 T_a 일때, 3가지 작동온도 T_v 에 대해 작동시간 τ 에 따라 측정된 수소가스온도 T_h 를

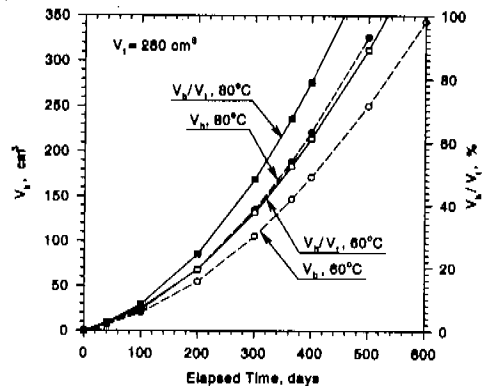


Fig. 8 Volume occupied by hydrogen and ratio of the volume to total heat pipe volume.

식 (15)와 같이 나타낸다. 여기서 작동온도의 함수 B는 식 (16)과 같이 표현한다.

$T_{vi}(=T_h)$ 대한 포화압력 P_{vi} 및 T_v 에 대한 포화압력 P_v 로부터 식 (7)에 의해 수소가스분압 P_h 를 계산한다.

따라서 수소가스 점유체적 V_h 는 식 (14)에 의해 계산된다.

4.6 수명평가 결과비교

본 메탄올-스텐레스강 히트파이프와 기존의 물-스텐레스강 히트파이프의 실험결과^{(4),(6)}를 비교하면 다음과 같다.

본 실험에서 시험대상으로 한 히트파이프 크기는 Fig. 2에 나타낸 것 같이 $\phi 19 \times 1000 \text{mm}$ 인 써모사이폰이다. 반면에 Petric⁽⁶⁾의 시험대상은 땅으로 된 워크를 갖는 히트파이프로써 크기는 $\phi 11.2 \times 355 \text{mm}$ 이다. 즉 본 실험에서 사용된 히트파이프 체적은 280cm^3 이고, Petric의 실험인 경우는 35cm^3 이 된다. 따라서 본 히트파이프(작동온도가 100°C 인 경우) 및 Petric의 히트파이프(작동온도가 $200^\circ\text{F}=93.33^\circ\text{C}$ 인 경우)에 대해, 단위 체적당 발생하는 수소가스량은 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다.

그림으로부터 본 실험의 메탄올-스텐레스강 히트파이프인 경우가 Petric의 물-스텐레스강 히트파이프인 경우에 비해 단위 히트파이프 체적당 발생하는 수소가스량은 2.4~2.7배 정도로 나타났다. 그러나 두 경우의 히트파이프는 재료준비, 제

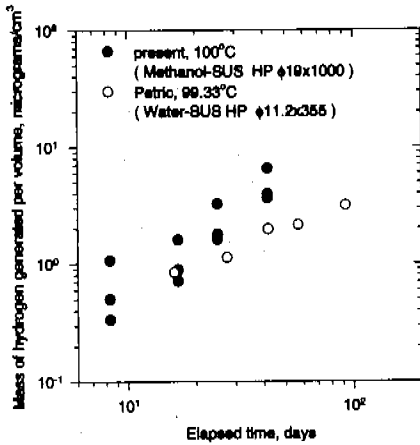


Fig. 9 Comparison between present and Petric's results per heat pipe volume.

작공정 등이 서로 상이함으로 메탄올-스텐레스강의 조합이 물-스텐레스강의 조합보다 부적합하다고 단정할 수는 없다.

4.7 수명평가시 주의사항

위에서 언급한 것처럼 히트파이프 수명은 작동액체와 판재료의 적합성 뿐만아니라 히트파이프의 제작과정, 히트파이프 재료준비 등에 크게 관계된다.

따라서 시험대상인 히트파이프 샘플은 동일한 양 및 동일한 종류의 작동액체로 충전되어야 하며, 동일한 기술로 제조되어야 한다.

샘플의 제조전 및 수명시험 후의 모든 재료에 관한 화학적, 금속학적 분석을 행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

또한 본 실험에서는 수명추정기간이 40일 정도 이었는데 보다 정확한 수명추정을 위해서는 가능한 한 장기간 시험하는 것이 바람직할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 히트파이프의 전체 온도분포를 측정함으로써 히트파이프의 수명을 간이평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 간이 평가방법을 메탄올-스텐레스강 히트파이프의 9개 샘플에 대한 가속 수명시험에 적용하였다.

그 결과 온도분포 측정으로 수소가스량을 계산하고 이를 Arrhenius model에 도입함으로써, 작동온도 및 작동시간에 따른 수소가스 발생량을 추정할 수 있었다. 또한 수소가스 발생량 및 작동온도로부터 사용시간에 따른 히트파이프내의 수소가스 점유체적을 예측할 수 있었다. 이와 같은 방법은 실제 히트파이프 제작업체에서 제품의 신뢰성을 평가하는 데 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

향후 본 수명평가 방법을 기초로 하여 다양한 작동유체 및 다양한 판재질의 히트파이프에 대한 수명평가가 수행될 수 있을 것이다. 이러한 수명시험을 위해서는 동일한 기술로 제조된 히트파이프 샘플의 준비, 시험대상 히트파이프 내부의 동일한 작동유체 충전, 샘플의 제조전 및 수명시험 후의 모든 재료에 관한 화학적 금속학적 분석이 필요하다.

참고문헌

- (1) Lee, Y.P., Poláček, F., 1998, "Life Tests of Steel-Water Heat Pipes," *Proc. of the 2nd Heat Pipe Workshop Korea* (Taejon)
- (2) Novotna, I., Poláček, F. and Stulc, P., 1987, "Life Tests of Steel-Water Heat Pipes," *Research Report of the SVUSS* (Prague)
- (3) Novotna, I., Nassier, J. and Zelko, M., 1988, "Compatibility of Steel-Water Heat Pipes," *3rd Int. Heat Pipe Symposium* (Tsukuba), pp.89~95
- (4) Baker, E., 1973, "Prediction of Long-Term Heat Pipe Performance from Accelerated Life Tests," *AIAA Journal*, Vol.11, No.9, pp.1345~1347
- (5) Dunn, P.D. and Reay, D.A., 1993, *Heat Pipes*, Pergamon Press London
- (6) Petrick, S.W., 1972, "Hydrogen Gas Generation in Water-Stainless Steel Heat Pipes," *ASME Paper 72-WA/HT-37*, pp.2~7
- (7) Pioro, L.S. and Pioro, I.L., 1997, *Industrial Two-Phase Thermosyphons*, bell house, pp.14~19
- (8) 池田義雄 外2人, 1981, "ユ-ザのためのヒートパイプ應用", 學獻社, pp.53~55