

열파이프의 구조와 원리

Heat Pipes: Structures and Principles.

金 琪 鉉*
Ki Hyun Kim

1. 머리말

열파이프는 작동유체가 밀폐된 용기내에서 증발과 응축의 상변화를 반복하면서 자력으로 증발부와 응축부 사이를 순환하며 작은 온도차에서 많은 열을 수송하는 대단히 효과적인 열전달 기구이다. 이론적으로 열파이프는 열적으로 초전도체로 간주될 수 있으며 실제로 유효열전도계수가 구리의 수백 내지 수천배에 이른다.

열파이프의 원리는 이미 1942년에 General Motors 사의 Gaugler 에 의해 발표되었으나 오랫동안 빛을 보지 못하다가 1964년에 이르러 Los Alamos 의 Grover 등의 “재발명” 이후부터 급속도의 발전을 거듭해오고 있으며 “heat pipe” 라는 이름도 이때 붙여진 것이다.

이 글에서는 열파이프의 기본구조와 기초되는 원리를 간략하게 소개하고자 한다.

2. 구조와 작동원리

2.1 일반형 열파이프

열파이프는 그 구조면에서 그리고 작동유체의 증발, 응축현상을 이용하여 열을 전달한다는 점에서 2-상 열싸이폰(2-phase ther-

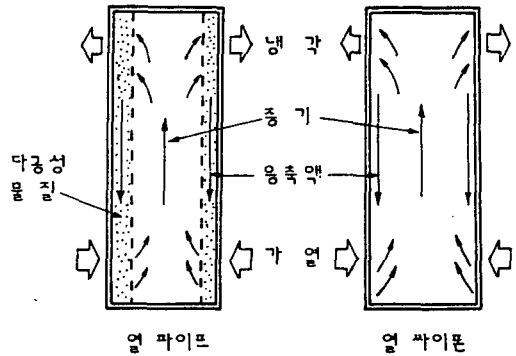


그림 1. 열파이프와 2-상 열싸이폰

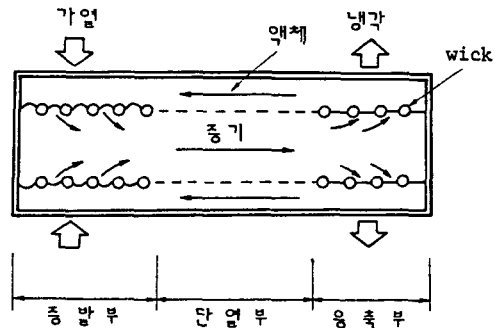


그림 2. 열파이프

mosyphon)과 유사하다(그림 1). 그러나 후자의 경우 작동유체의 순환이 중력에 의해 이루어지므로 항상 직립상태가 유지되어야 하나 열파이프의 경우 이러한 제약없이 어떠한 각

도에서도 기능을 상실하지 않는다.

그림 2는 모세관력을 이용하는 열파이프의 기본구조를 보여주며 일반적으로 열파이프라 하면 이러한 형태의 것을 일컫는다. 견고한 밀폐용기의 내면에는 응축액의 통로가 되는 다공성 물질(wick)의 층이 있고 이 다공성 물질은 작동유체로 적셔있다. 작동유체는 보통 10^{-4} torr 이하의 진공하에서 주입되고 밀봉된다.

증발부에서 외부로부터 열이 주입되면 wick을 적시고 있던 액체가 증발하고 액체의 표면이 wick 속으로 몰려나면서 계면이 곡면으로 되며 이 계면을 건너서 모세관 압력(capillary pressure)이 발생한다(그림 3).

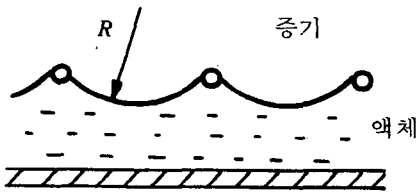


그림 3. 액체-증기의 계면

모세관 압력은 표면장력으로부터 기인하며 잘 알려진 Laplace-Young 식으로부터 계산할 수 있고, 곡면이 구(球)의 일부라고 간주할 때는 다음과 같이 된다.

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma}{R}$$

여기서 σ 는 작동유체의 표면장력, R 은 곡면의 곡률반경이다. 이 압력은 증기를 증발부로부터 응축부로 보내고 여기에서 냉각되어 응축된 응축액을 다시 증발부로 되돌아 오게 한다. 즉, 공기와 응축액이 유동할 때 발생하는 저항을 극복해 주며, 열파이프가 정상적으로 작동하려면 최대 모세관 압력 $(\Delta P_c)_{max}$ 은 다음의 식을 만족시켜야 한다.

$$(\Delta P_c)_{max} \geq \Delta P_v + \Delta P_l$$

여기서 ΔP_v 는 증기의 압력손실이고 ΔP_l 은 응축액의 압력손실이다.

wick는 응축액의 통로가 되기 때문에 가능

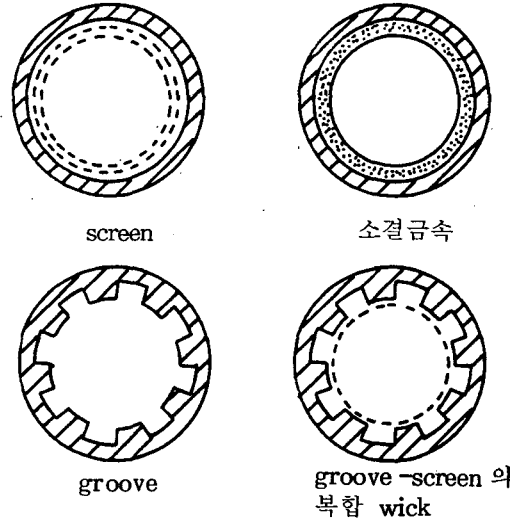


그림 4. 대표적인 wick의 단면

한 유동저항이 적고 동시에 큰 모세관압력을 발생시키는 것이어야 한다. 지금까지 여러가지 형태의 wick이 개발되어 있으며 그 중 몇 가지 대표적인 것들이 그림 4에 그려져 있다.

2.2 특수형 열파이프

2.2.1 회전형 열파이프

그림 5는 원심력을 이용하여 응축액을 증발부로 복귀시키는 회전형 열파이프의 원리를 설명해준다. 이 열파이프 속에는 wick이 없는 대신 내벽의 지름이 응축부에서 증발부로 가면서 점점 크게 만들어져 있으며, 따라서 열파이프가 회전하면 원심력이 발생하고 이 힘의 축방향 분력으로 인하여 응축액이 증발부로 유동하게 된다.

2.2.2 기 타

삼투압을 이용하는 삼투식 열파이프(osmotic heat pipe), 정전기력(靜電氣力)을 이용하는 전기유체형 열파이프, 전자기력(電磁氣力)에 의존하는 전자유체(電磁流體)형 열파이프 등이 있으나 널리 보급되어 있지는 않다.

2.3 제어형 열파이프

열파이프는 단순히 열전달을 목적으로 하는 것 이외에도 i) 열파이프의 한 부분의 온도를 일정하게 유지시키는 가변콘딕탄스 열파이

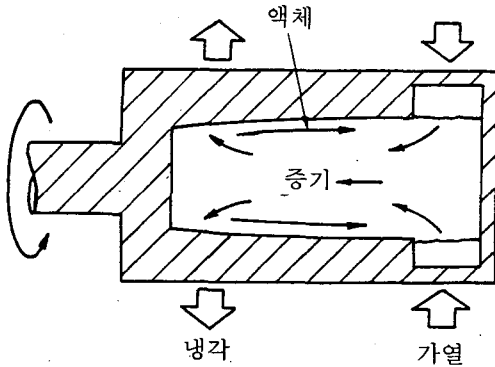


그림 5. 회전형 열파이프

프 (Variable Conductance Heat Pipe - VCHP), ii) 열원의 온도가 과도하게 높을 때 열의 흐름을 차단하는 열스위치 (thermal switch), iii) 한 방향으로의 열전달은 가능하나 역방향의 열유동을 억제해주는 열다이오드 (thermal diode) 등이 개발되어 있으며 여기서는 VCHP와 열다이오드의 가장 간단한 형태만을 소개한다.

2.3.1 VCHP

가변콘덕탄스 열파이프는 광범위한 응용가능성 때문에 큰 관심의 대상이 되어왔으며 가변콘덕탄스를 얻는 방법도 여러가지 개발되어 있다. 그중 가장 간단한 것의 하나가 그림 6에 그려져 있다. 일반형 열파이프와는 달리 VCHP 속에는 작동유체와 함께 불응축성 기체가 들어 있으며 정상시에는 이 기체가 증기통로를 채우고 있다. 그러나 증발부에 열이 주입되면 작동유체는 증발하고 증기는 응축부로 이동하며 이 때 불응축성 기체도 따라서 응축부로 이동한다. 그러나 응축부에 도달하면 증기만이 응축되어 wick을 통해 증발부로 되돌아 오고 기체는 응축부에 남게되며 결국 모든 기체는 응축부에 모이게 되어 증기와 기체 사이에 명확한 경계면이 형성된다. 이 경계면의 위치에 따라 응축면적이 변하고 따라서 열방출률도 달라진다. 즉, 주입열량이 커지면 열파이프의 증발부의 온도가 높아지며 이것은 증기압의 상승을 초래하고 이 압력에 의해 경계면이 뒤로 물러나 응축면적이 커진다. 따라

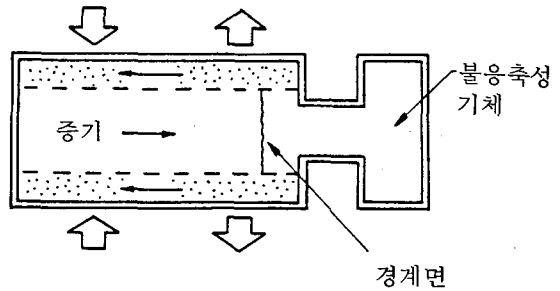


그림 6. VCHP

서 외부로의 방출열량이 증가하고 증발부의 온도상승을 억제하게 된다. 주입열량이 감소하면 정반대의 현상이 일어나고 결국 증발부의 온도가 어떤 범위내에서 일정하게 유지된다.

2.3.2 열다이오드

다이오드의 효과를 얻기 위해 liquid trap을 사용하는 방법이 그림 7에 예시되어 있다. 열파이프의 증발부에 용기가 달려있고 이 용기내의 wick과 열파이프의 wick은 단절되어 있다. 정상상태에서는 응축부에서 돌아온 액체는 용기내로 들어가지 않고 증발되어 순환이 계속된다. 그러나 열유입부가 바뀌어 열유동의 방향이 반대로 되면 증기는 용기속으로

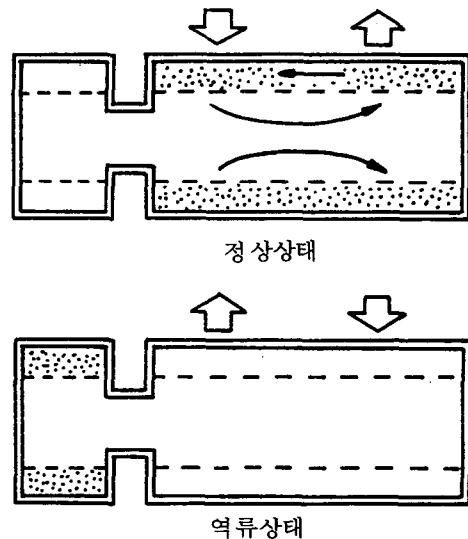


그림 7. 열다이오드

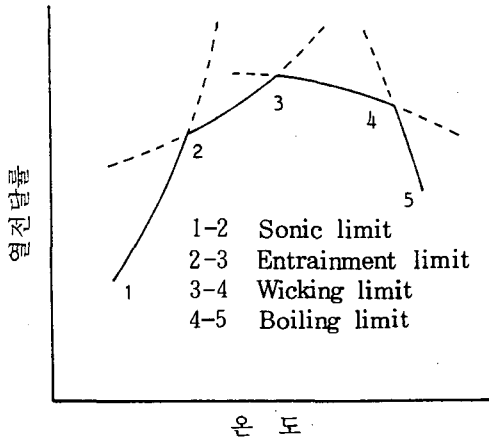


그림 8. 열파이프의 작동한계

들어가게 되고 이곳에서 응축된 유체는 열원 쪽으로 되돌아가지 못하며 결국 대부분의 작동유체가 용기속에 모이게 되어 열파이프는 그 기능을 잃게 된다.

3. 열파이프의 작동한계

열파이프는 대단히 큰 콘다탄스를 가지는 열전달 기구이나 그것은 몇가지 유체역학의 원리에 의해 지배되는 열전달 한계를 가지고 있다(그림 8).

3.1 Sonic Limit

열파이프의 증기통로를 따라 각 단면에서의 증기 질량 유량을 살펴보면 증발부가 시작하는 곳(열파이프의 끝)의 영에서부터 거리에 따라 점점 증가하여 증발부가 끝나는 곳에서 최대가 되며 응축부에서는 그 반대 현상이 생긴다. 따라서 증기의 속도도 영에서 시작하여 최대가 되었다가 다시 영이 되며 이것은 수축-확대 노즐내에서의 유동현상과 유사하다. 어떤 조건하에서는 증기의 최대속도가 음속에 도달하여 choking 현상이 일어나고 더 이상의 질량유량의 증가를 얻을 수 없으며 따라서 열수송의 한계에 도달한다.

3.2 Entrainment Limit

열파이프내에서 증기와 응축액의 유동방향

은 서로 반대방향이며 따라서 그 계면에 전단 응력이 발생하고 계면이 불안정해진다. 상대속도가 충분히 커져 Weber 수가 1에 도달하면 액체방울이 분리되어 증기유동속으로 빨려 들어가 증발부에 도달하지 못하고 응축부로 되돌아가게 된다. 이렇게 되면 증발부에 도달하는 작동유체의 양이 줄어들며 증발부의 wick에 건조현상(dry out)이 발생한다.

3.3 Wicking Limit (또는 Capillary Limit)

열파이프에서 작동유체의 순환은 모세관압력에 의해 유지되며 열파이프내에서 얻을 수 있는 최대 모세관압력에 해당하는 최대 질량유량이 존재한다. 만약 증발부에 과도한 열이 주입되어 작동유체의 증발률이 최대 질량유량을 초과하게 되면 결국 증발부에서 건조현상이 일어나고 열파이프의 기능이 정지된다.

3.4 Boiling Limit

열파이프의 증발부에 반지름 방향의 온도구배가 존재하기 때문에 증발부 wick 속의 액체는 항상 과열상태에 있으며 과열도가 높아지면 wick 속에서 기포가 발생한다. 이때 기포가 발생한 점의 온도가 올라가 hot spot 이 형성되고 기포는 유체의 유동을 저해함으로써 열전달률이 떨어지며 이 한계를 비등한계라 한다.

4. 맺음말

Grover 의 연구결과가 발표된 이후 사반세기 동안 열파이프는 기초이론과 응용면에서 눈부신 발전을 기록하였다. 열파이프에 관한 국제학술회의가 매 3년마다 정기적으로 개최되어 수많은 논문이 발표되고 있으며, 1980년 자료에 의하면 일본의 경우 특허청에 등록된 열파이프 관련 특허 및 실용신안이 900건을 넘어섰고 Netherlands 에 있는 European Patent Office 의 1975~1985년 사이의 통계에 의하면 700여건의 특허가 공개되었다.

그러나, 구미의 여러나라는 물론 가까운 일

본과 중국에서도 이 분야에 대한 활발한 활동이 이루어지고 있으나, 유독 우리나라에서의 활동은 극히 미미한 실정이다. 이제 “열파이프”는 공학자에게 전혀 생소한 용어는 아니며 근래에 출판되는 열전달 교과서에서는 이 분야에 지면의 일부를 할애하기에 이르렀다. 젊은 공학자들의 앞으로의 활약을 기대해본다.

참 고 문 헌

1. P. Dunn and R. A. Reay, Heat Pipes (2nd ed.), Pergamon Press, 1978.
2. S. W. Chi, Heat Pipe Theory and Practice, Hemisphere Pub. Corp., 1976.
3. 池田義雄, 伊藤謹司, 槌田昭, ユーザのためのヒートパイプ應用, 學獻社, 1981.
4. 山西哲夫, 清水定明, ヒートパイプとその應用, オーム社, 1980.
5. C. L. Tien, “Fluid Mechanics of Heat Pipes”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 7, 1975. pp. 167 ~ 185.

1. P. Dunn and R. A. Reay, Heat Pipes