

Heat Pipe의 발달 역사를 통하여 본 응용사례

이운표 <공학박사 · 한국과학기술연구원 공조환경제어연구실 선임연구원>

1. Heat Pipe의 원리 및 종류

Heat Pipe의 원리는 다음과 같다. 즉 진공용기안의 작동유체는 증발부에서 액상에서 기상으로 상태가 바뀌면서 주변의 열을 빼앗아 간다. 또한 응축부에서 주변으로 열을 방출하면서 액체로 바뀐 작동유체는 증발부로 다시 돌아오게 된다. 이때 증발부의 압력은 응축부에 비해 높으므로 기체로 바뀐 작동유체는 항상 증발부에서 응축부로 이동하게 된다. 그러나 응축부에서 액체로 바뀐 작동유체는 저절로 증발부로 복원하지는 않는다. 따라서 인위적으로 복원력을 만들어 주어야 하는데 이때의 복원력으로 중력을 사용하는 그림 1과 같은 형태를 열사이폰(Thermosyphon)이라 부른다. 이에 반해 중력이 존재하지 않을 때나 구조상 중력을 이용할 수 없는 경우, 모세관 현상을 이용하기 위하여 위크를 용기안에 삽입한 그림 2와 같은 형태를 일반적인 Heat Pipe라고 부른다. 또한 모세관 현상이 아닌 회전에 의해 발생하는 원심력을 이용하는 경우를 회전형 Heat Pipe라고 부를 수 있는 것은 이 복원



력의 종류에 따라 표 1과 같이 여러 가지가 있다.

그러나 이와 같은 인위적인 분류는 별로 의미가 없다. 왜냐하면 최근에는 위에 서술된 각각의 종류를 복합한 새로운 개념의 Heat Pipe등이 발표되고 있기 때문이다. 즉 중력을 이용할 수 있는 경우에도 위크를 인위적으로

삽입하기도 하는 데 이때의 위크는 복원력을 촉진시키고 작동유체를 증발부 전범위에 끌고루 퍼지게 하는 역할을 한다. 최근 발표되고 있는 지름 1mm 이내의 극소형 Heat Pipe에서는 별도의 위크를 삽입하지 않고 그 구조 자체가 위크의 개념이 되도록 제작하고 있다. 또한 회전형 Heat Pipe의 경우에도 원심력으로 액체가 가열부로 복원하기 위해선 축내부를 경사가 지게 가공하여야 하나 가공자체가 매우 어려우므로 위크를 삽입하여 복원력을 이용할 수 있도록 제작되기도 한다.

2. 자연에서 물의 순환과정

흔히들 Heat Pipe는 1963년 Grover에 의해 발명

Gravity	Thermal syphon
Capillary force	Standard heat pipe
Centripetal force	Rotating heat pipe
Electrostatic volume forces	Electrohydrodynamic heat pipe
Magnetic volume forces	Magnetohydrodynamic heat pipe
Osmotic forces	Osmotic heat pipe
Bubble pump	Inverse thermal syphon

표 1 응축된 작동유체의 복원력에 따라 분류한 Heat Pipe의 종류

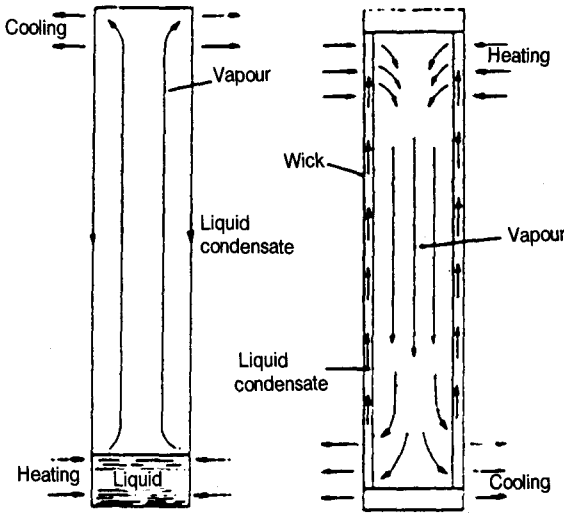


그림 1 열사이폰의 작동원리 그림 2 Heat Pipe의 작동원리

되었다고 전해진다. 그러나 우리가 살고 있는 대자연의 유심히 관찰하여 보면 Heat Pipe의 원리는 Grover 이전부터 응용되어왔음을 알 수 있다.

즉 사람은 더우면 옷을 벗고 그래도 더우면 바람이 부는 곳으로 얼굴을 향함으로써 더위를 식혀왔다. 그러나 이것으로도 부족하면 땀의 증발을 통하여 몸의 온도를 유지시키는데 이와 같은 땀에 의한 증발, 즉 액체에서 기체로 바뀔 때의 잠열(Latent Heat)을 이용하는 행위는 몸의 온도를 유지하는데 있어서 최고의 효과를 갖는다고 할 수 있다. 식물의 경우도 마찬가지이다. 대부분의 식물에 있어서 잎으로부터 물을 증발시키는 과정은 더위로부터 식물 자신의 온도를 유지시키기 위한 것이다. 이와 같이 지상의 생물이나 바다등에서 증발한 수증기는 하늘의 차가운 주위 온도 때문에 물방울로 응결되어 중력에 의해 지상으로 떨어짐으로써 자연의 순환 질서가 유지되고 있다.

이같은 자연에서 일어나는 순환과정 때문에 우리는 거대한 Heat Pipe 안에서 살고 있다고 말할 수도 있으며 이런 관점에서 볼 때 구태여 언제부터 Heat Pipe란 것이 발명되었다고 말하는 것은 무리

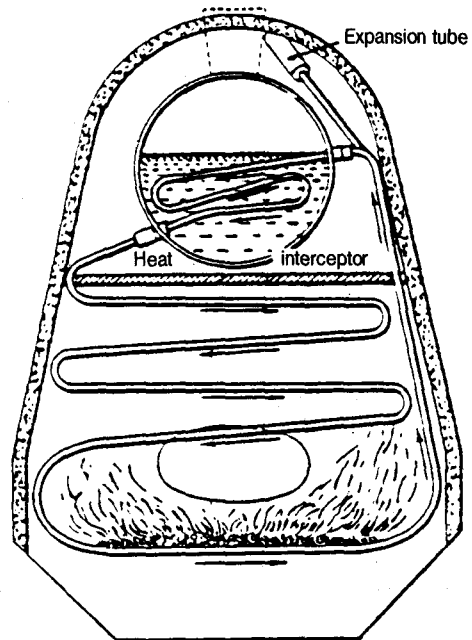
일 것이다. 그러나 편의상 이와 같은 자연내의 물의 순환과정을 작은 용기에 담아 구현한 것을 Heat Pipe의 원조라고 편의상 정의하기로 하고 그의 기원을 거슬러 올라가 보기로 한다.

3. Heat Pipe의 역사적인 발전과정

3.1 Perkins Tube

우선은 Heat Pipe가 사용되기 전 수십년 동안 사용되어 왔고 현재도 사용되는 Perkins Tube에 대해 살펴보자.

Angier March Perkins는 18세기 말에 미국의 Massachusetts에서 태어나서 영국으로 이주해 왔는데 이곳에서 Perkins는 보일러나 열전달장치 등의 개발에 관한 일을 하였다. Perkins가 그의 아들과 함께 1898년에 특허로 제출된 'Perkins'라는 시스템은 그림 3과 같다. 튜브의 한 부분은 버너에 접촉되어 있으며 버너에 의해 가열된 고온 고압의 물



"The Engineer"

Swain Sc.

그림 3 Perkins 보일러

은 상승하여 상부의 용기에 담겨져 있는 물을 가열하고 다시 버너로 돌아오게 된다. 이때 튜부안의 압력이 높을수록 열용량이 커지므로 좋을 것이다. 실제로 이 장치는 4000psi까지의 압력에서 구동되도록 설계되었고 주로 왕복동 보일러에 제일 먼저 적용되었으며 100년 이상 상품화되어 왔다.

3.2 열사이폰

이후 F. W. Gay에 의해 1929년에 그림 4와 같은 현재의 가스-가스 열교환기와 거의 형태인 Perkins Tube 또는 열사이폰이 특허로 제출되었다.

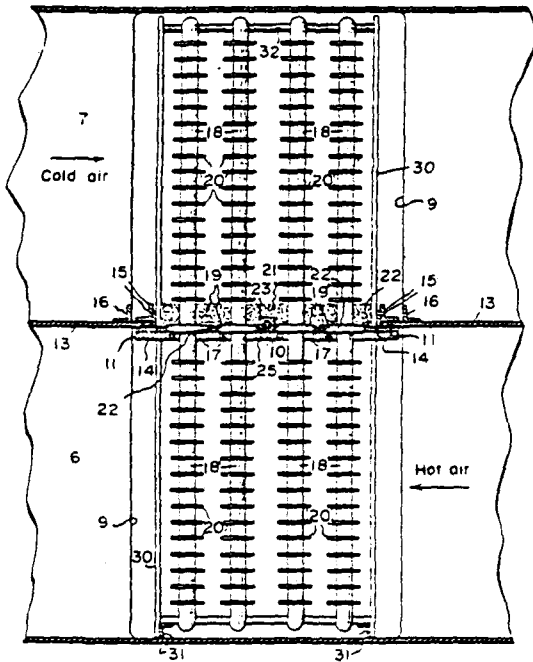


그림 4 F.W. Gay에 의해 제안된 열사이폰형 열교환기

Perkins Tube의 주요한 용도는 빵 굽는 오븐이었다. 이 중 가장 먼저 적용된 예는 19세기의 영국육군에서 사용된 휴대용 오븐으로서 빵을 굽는 곳과 분리된 곳에서 연소가 이루어지게 되어 있다. 따라서 튜부안의 증기에 의해서 연소실로부터 빵굽는 곳으로 열이 전달되게 되어 있다. 이후 가스 등이 석탄을 대체하게됨에 따라 그림 5와 같은 오븐이

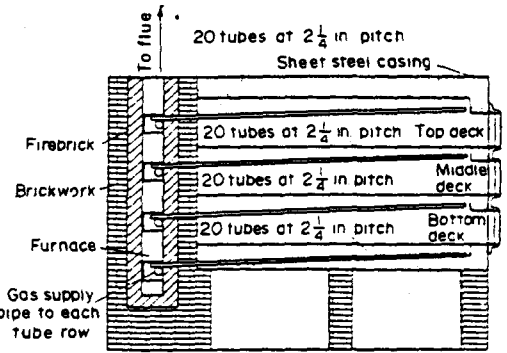


그림 5 80개의 열사이폰을 사용한 빵 굽는 오븐

등장하게 되었다. 이 오븐에는 80개의 튜부가 가스 화염에 의해 가열되게 되어 있다. 이 때 오븐의 최고온도는 섭씨 230도에 달하고 증발부 길이는 5cm 이나 응축부의 길이는 3m로 매우 길었다. 튜부의 지름은 3cm이며 벽의 지름은 5mm 정도였다. 이때의 작동유체는 과열로 인한 dryout을 걱정하여 전체 체적의 32%를 주입하였다. 이 양은 현재의 Heat Pipe나 열사이폰에서 가열부 체적의 약 50%를 주입하는 것과 비교해 볼 때 훨씬 많은 양이었다.

20세기에 들어 열사이폰의 이용으로 주목할 만한 것은 Critchley-Norris 자동차 라디에이터이다. 이 라디에이터에는 냉각수를 냉각하기 위하여 그림 6과 같은 110개의 열사이폰을 사용하였으며 fin이 달린 열사이폰의 응축부는 자동차가 달릴 때 공기의 유동에 의해 냉각되게 설계되어 있다.

3.3 Heat Pipe

Heat Pipe의 아이디어는 1942년 12월 미국 오토바이의 General Motors 회사의 R. S. Gaugler에 의해 미국 발명특허로 제안되었는데 이때의 Heat Pipe는 냉장시스템에 적용되기 위해 고안되었다. Gaugler는 작동유체가 열을 전달한 후 액체로 바뀌어 가열부로 돌아오는 수단으로써 모세관 현상을 제안하였다. Gaugler는 모세관 현상을 야기시킬 수 있는 구조로 Sintered Iron Wick를 제안하였다. 그

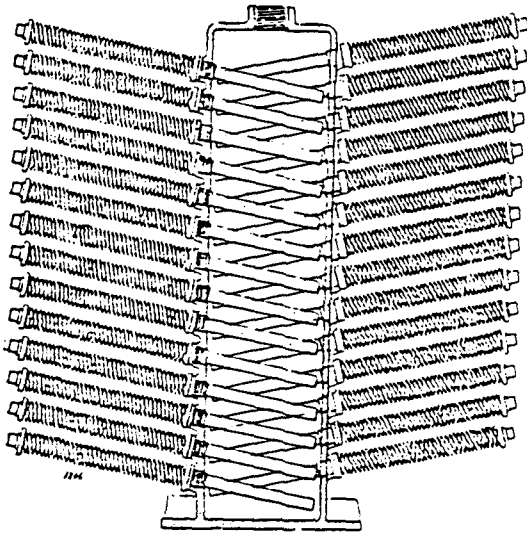


그림 6 Critchley-Norris 라디에이터

그림 7은 Gaugler가 제안한 위크 구조인데 그림의 검은 부분은 Sinter Iron Wick를 나타내는데 세 그림 모두 기체의 통로 즉, 흰 부분이 위크보다 좁은 것이 특이하다. Gaugler에 의해서 제안된 냉장고가 그림 8에 나와 있다. Heat Pipe는 냉장고 내부의 열을 얼음조각이 담겨져 있는 밑부분으로 전달시키기 위하여 설치되었다. 그러나 Gaugler의 고안은 특허수준에 머물고 말았는데 그 이유는 Heat Pipe가 아닌 다른 열전달 수단으로도 이와 같은 기능은 대신할 수가 있었기 때문이다.

미국 원자력위원회(the United States Atomic Energy Commission)의 Grover가 1963년에 Gaugler의 것과 근본적으로 동일한 기구를, 실험 및 이론과 함께 'Heat Pipe'란 이름으로 특허를 출원하였다. 이때의 Heat Pipe의 재질은 Stainless Steel이며 위크로써 Wire Mesh Wick를 사용하였고 작동유체로는 Sodium을 사용하였다. 또한 Lithium과 Silver도 작동유체로 거론되었다. 이후 Grover의 주도 아래 Los Alamos Lab.을 중심으로 진행되어온 연구결과들이 1966년 최초로 책으로 발간되었다. 이후 영국에서도 연구가 활발하게 진행



그림 7 Gaugler가 제안한 Heat Pipe의 위크 형상

되었는데 이때의 주 관심사는 원자력과 관계한 것이었다. 최초로 상업적인 계약이 체결된 것은 1964년에서 1966년 사이의 미국정부의 계약에 의한 것이다. 이때의 Heat Pipe는 유리, 구리, 니켈, Stainless Steel 등으로 각각 제작되었으며 작동유체로는 물, Caesium, Sodium, Lithium, Bismuth 등이었으며 최고 온도 섭씨 1650도를 얻을 수 있었다. 이와 함께 Deverall과 Kemme가 물을 작동유체로 하는 인공위성용 Heat Pipe를 선보였으며 인공위성을 위한 Variable Conductance Heat Pipe도 개발되었다. 1967년과 1968년 사이에 Heat Pipe는 전자기기의 냉각, 에어컨, 엔진 등의 냉각 분야에도 적용되기 시작하였다.

우주에서 Heat Pipe의 작동여부를 실험하기 위해 Heat Pipe의 한 쪽 끝이 전기적으로 가열되게 설계되었으며 실제로 Water/Stainless Steel Heat Pipe는 지구궤도를 5번 도는 동안 성공적으로 작동하였다. Heat Pipe 이론은 Cotter 및 Cheung에 의해 많은 발전을 하였는데 특히 Cheung는 섭씨

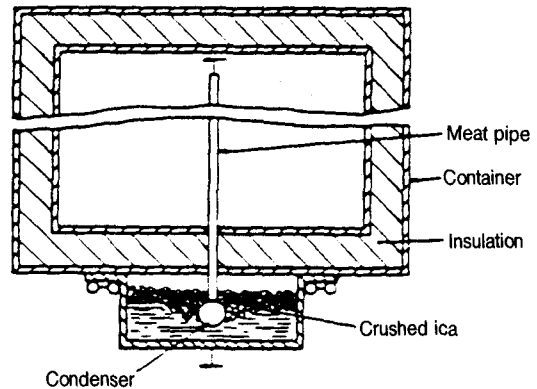


그림 8 1944년 Gaugler에 의해 특허로 제출된 Heat Pipe를 사용하는 냉장고

1500도 하에서 9000 시간의 수명실험을 수행하였다. Cheung는 이외에도 그림 9와 같은 Arterial 형태의 위크를 제작하였는데 이 위크는 알콜을 작동유체로 사용하는 유리대롱속에서 실험되었다.

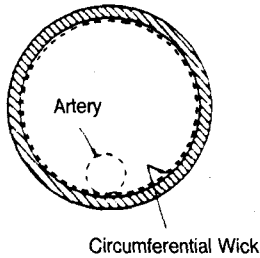


그림 9 Katzoff에 의해 개발된 Arterial Wick

Arterial 위크의 역할은 응축부에서 증발부로의 액체의 복원시 압력 강하를 줄이기 위한 것으로 이후 인공위성에 많이 사용되고 있다. 1968년에 실제로 위공위성의 온도조절을 위해 Heat Pipe가 사용되었다. 이 Heat Pipe는 6061 T-6 알루미늄 합금으로 사용하여 제작하였으며 Wick로는 120mesh 알루미늄을 사용하였다. 작동유체로는 Freon-11이 작동유체로 사용되었다. 이때의 Heat Pipe의 용도는 GEOS-B 인공위성 표면의 온도구배를 줄이는 일이었다. 실제로 145일 동안 작동시킨 결과 이전의 Heat Pipe를 사용하지 않은 인공위성 GEOS-A 경우보다 현저하게 온도구배를 줄일 수 있었다. 이 당시 유럽에서는 Heat Pipe의 수명시험, 축방향 또는

반경방향 열유속에 관한 연구가 이루어졌다. 일본에서는 Kisha Seizo Kaisha 회사에 의해 Heat Pipe가 개발되었는데 주로 에어컨의 열교환기에 적용되는 Fin 달린 Heat Pipe에 대한 연구가 수행되었으며 이 Heat Pipe 열교환기는 현재까지 상업화되어 사용되고 있다. 이 때까지의 Heat Pipe는 주로 Pipe 형태였으나 1969년에 증발부의 접촉면적을 넓힌 Flat Plate Heat Pipe가 선보였다. 또한 같은 시기에 응축부의 길이를 변화시킴으로써 수송되는 열량을 조절할 수 있는 Variable Conductance Heat Pipe가 선보였으며 Wick가 없이 원심력을 이용하는 Rotating Heat Pipe가 개발되어 모터나 터빈 블레이드를 냉각시키는데 응용되었다. 이 회전형 Heat Pipe는 Wick를 사용하는 일반 Heat Pipe에 비해 모세관 한계에 대한 제한을 받지 않으므로 열전달 능력이 우수하다. Heat Pipe를 전자기기의 냉각에 이용한 것은 1969년에 Sheppard에 의해 사각형 형태의 Heat Pipe를 Integrated Circuit에 적용한 것이 최초이다. 앞에 서술된 Heat Pipe의 용도는 주로 작동유체로 Liquid Metal이나 물, 아세톤, 알콜 등을 사용하였으나 1970년에 들어 영국의 Rutherford High Energy Lab.을 중심으로 극저온용 Heat Pipe에도 관심을 갖게 되었다. 이때의 작동유체는 액체수소가 사용되었는데 그 후에 절대온도 4.2K에서 작동하는 Helium Heat Pipe도 개발되었다. 1970년 말에 알래스카 파이프 라인의 기반을

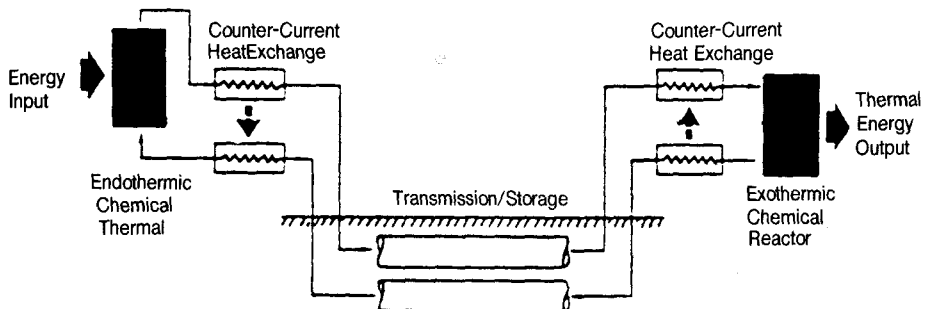


그림 10 Chemical Heat Pipe의 개념도

유지시키기 위해 대량의 Heat Pipe가 이용되었다. 이 때의 Heat Pipe는 땅 속의 지열을 상부로 전달시켜 지반의 온도를 사계절 어느정도 유지시켜 주는데 사용되었는데 이 때 사용된 Heat Pipe의 길이는 9-23m이며 12,000개의 Heat Pipe가 사용되었다. 1981년에는 Sony 회사에서 Tuner-Amplifier에 대해 Heat Pipe를 적용하여 기존의 제품보다 50% 가볍고 30% 더 효율이 좋은 제품을 개발하였으며 이후 생산된 제품 수는 백만개에 육박하고 있다.

전통적인 Heat Pipe 대한 연구가 활발함과 아울러 'inverse' Thermal Syphon과 Gravity-Assisted Heat Pipe에 대한 연구가 최근들어 주목받게 되었다. 이 이유는 우주상에는 반드시 Wick가 필요하나 중력이 존재할 때는 열을 받는 부위가 중력에 대하여 아래에 위치한다면 Wick는 단지 보조적인 역할만을 수행하지 반드시 절대적인 것은 아니기 때문이다. 1970년대 중반 쯤에 미국의 General Electric Company에 의해 열 수송을 위한 화학 파이프 라인 시스템이 제안되었다. Chemical Heat Pipe Line 개념은 그림10과 같은데 길이 160km에 달하는 2개의 파이프 라인으로 나뉘어 있다. 열원이 가해지는 부위에는 촉매의 도움으로 화학 반응로에서 반응을 하여 열을 흡수하고 열을 방출하는 곳에서는 역반응을 하여 열을 방출하게 된다. 열을 방출한 혼합물은 Pump로 다시 가열부위로 회송하게 된다.

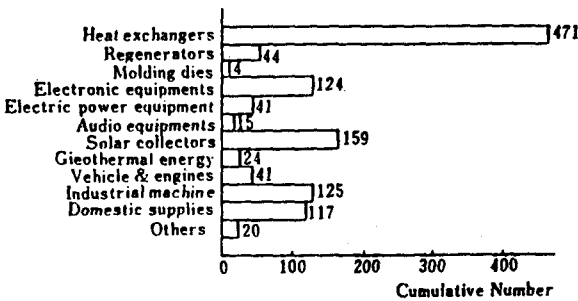


표 2 80년대까지 일본에서 각 분야별로 특허(P)로 제출 또는 실용화(U)된 사례

4. 결론

이와 같이 Heat Pipe의 발달과정은 그 제작 및 설계기술이 일반에 널리 보급되지 않고 현재도 선진국의 기술 보호주의에 따라 기술의 유출이 극히 제한되기 때문에 우주 개발과 관련한 기기나 군사용 기기 등 비교적 값비싼 기기의 냉각과 관련하여 발달하여왔다. 그러나 최근에 일본 및 중국등을 중심으로 Heat Pipe의 제작기술이 일반화되어감에 따라 일반기기에도 다양하게 적용되어 가고 있다. 실제로 최근에 조사된 표 2의 자료에 의하면 일본의 경우 Heat Pipe를 이용한 특허건 수는 상당한 수에 이르고 있으며 적용분야 또한 매우 다양해져 가고 있는 추세이다. 또한 이 가운데 실용화된 예도 그림 11과 같이 기하급수적으로 증가하고 있으며 수입된 음향기기 안에서 소형 Heat Pipe를 쉽게 발견할 수

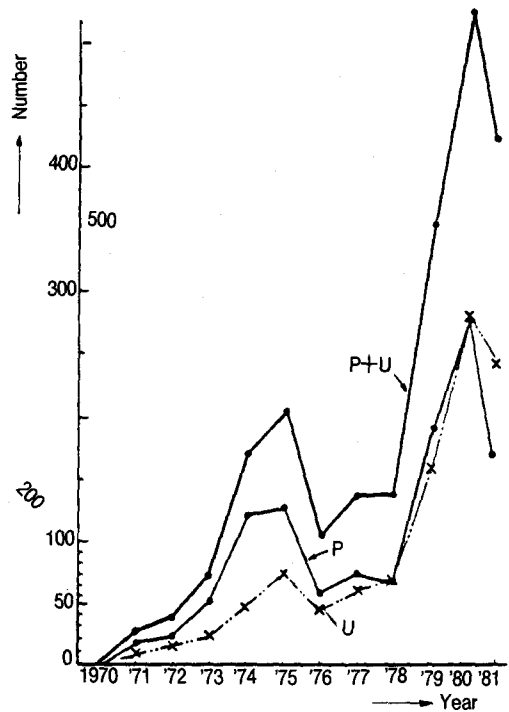


그림 11 80년대까지 일본에서 특허(P)로 제출 또는 실용화(U)된 사례

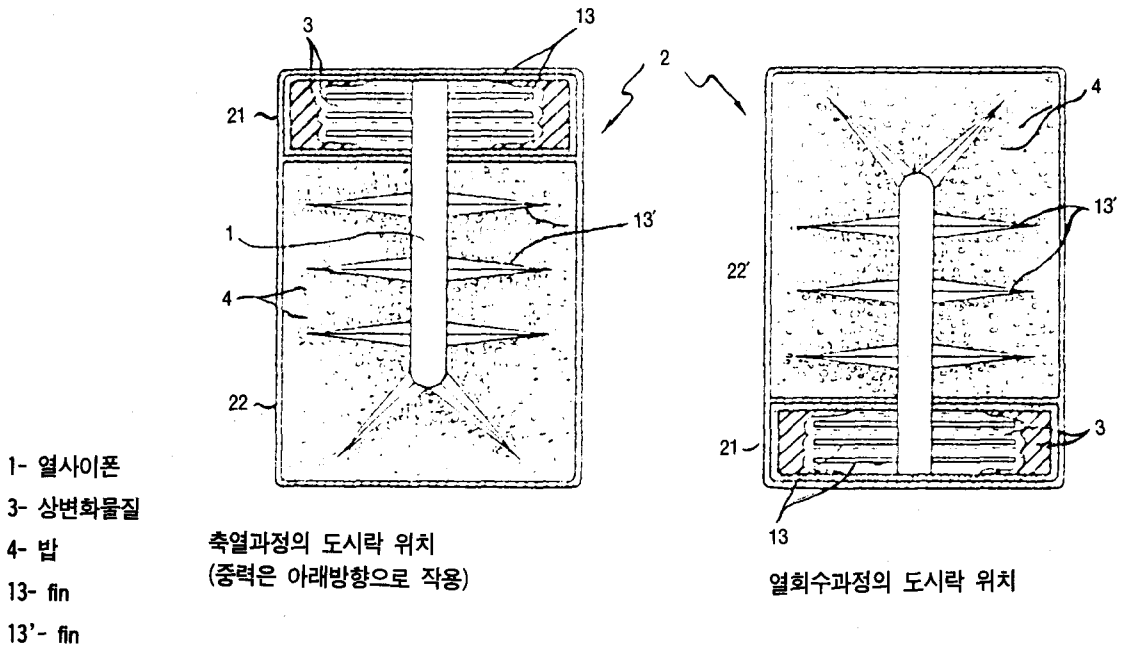


그림 12 열사이폰의 Thermal Diode 기능을 이용하여 축열 및 열회수가 가능하게 고안된 보온 도시락(실용신안등록출원 제17303호)

있다.

Heat Pipe는 한마디로 성능이 우수한 열전달 기구이므로 국부적으로 과열되어 냉각이 필요한 곳이나 열을 효율적으로 전달하고자 하는 곳에 한번쯤은 Heat Pipe를 적용해 보려고 시도해 보는 것도 좋을 것이다. Heat Pipe의 한 종류인 열사이폰이 중력에 대하여 열을 전달하기도 하고 차단하기도 하는 Thermal Diode 기능을 이용하여 특허 출원된 보온도시락을 소개하면서 글을 맺고자 한다.

많은 학생들은 아침에 따뜻했던 도시락의 밥이 점심에는 차갑게 변해있고 그 차가운 밥을 먹고 한번쯤은 배앓이를 했던 경험이 있을 것이다. 그림 12는 “자체가온 보온 도시락”이란 이름으로 특허 출원된 보온도시락의 개념도이다. 도시락의 밥이 갖고 있는 열을 주변으로 손실하는 양은 표면적과 온도 차이에 비례한다. 따라서 아침의 따뜻한 밥의 열을 열사이폰을 이용하여 도시락의 상부에 위치한 작은

부피의 잠열 축열조에 저장하고 점심 때 밥을 먹고자 할 때는 도시락을 돌려서 축열조에 저장된 열을 회수함으로써 비교적 따뜻한 밥을 먹을 수 있다. 이때의 문제는 열사이폰의 작동온도가 항상 일정 온도이면 비록 축열조에 열저장은 되었다 하더라도 열회수는 불가능하다. 그러나 열사이폰 및 Heat Pipe에서는 주변의 온도에 따라 열사이폰의 용기내의 압력이 자동으로 변화하므로 열회수될 때의 열사이폰의 작동온도는 축열때의 작동온도보다 낮다.

참고문헌

1. P. Dunn and D.A. Reay, "Heat Pipes", pp1~20.
2. S.W. Chi, "Heat Pipe Theory and Practice".
3. 伊藤謹可, “ユーザーのためのヒートパイプ應用”
4. “The Proceedings part II 5th Int. Heat Pipe Conf.”. Tsukuba Science City Japan, pp52~61.