

<論 文>

상부가열인 다공물질내의 열파이프 현상에 관한 실험적 연구

이진호* · 김홍제** · 함윤영** · 남궁규원***

(1988년 3월 4일 접수)

Experimental Study of the Heat Pipe Phenomenon in Porous Media Heated from Above

Jinho Lee, Hong-Jea Kim, Yun-Young Ham and K.W. Namgung

Key Words : Porous Media(다공물질), Top Heating(상부가열), Two-Phase Flow(2상흐름)
Heat Pipe Effect(열파이프 효과), The Leverett *J* Function(Leverett *J* 함수)

Abstract

An experiment was performed to study the heat pipe phenomenon of porous media heated above at one-dimensional steady state for the range of heat flux, 300 w/m²~2,000w/m². Glass beads, sand, and copper particles were used as porous media and distilled water was used as a working fluid. Result of experiment shows that the length of the two-phase zone increases with the decreasing particle size for the same heat flux. At relatively lower heat flux the length of the two-phase zone increases with the increasing heat flux, which contradicts the result of earlier work. However, its length remains nearly constant when the heat flux increases above a certain value. The length of the two-phase zone is proportional to the product of the heat flux by the hydrostatic capillary height under the limited value of heat flux, that is,

$$l_t = A(\dot{q} \cdot l_{cap}) + B, \quad \dot{q} \leq \frac{1}{A} \left(C + \frac{B}{l_{cap}} \right)$$

where *A* is 1.7×10⁻⁴ m²/w, *B* is 1.9×10⁻² m, and *C* is 0.43 for copper particles and 0.31 for glass beads and sand.

1. 서 론

상변화를 수반하는 다공물질내의 2상흐름(two-phase flow)의 효과는 다공물질이 비체적에 비해 비표면적이 매우 클 뿐만 아니라 액상의 유체가 증발되어 과열증기가 되는 과정에서 높은 열흡수용량(heat absorbing capacity)을 갖기 때문에 폐열의 회수, 지열에너지의 저장, 원자로의 냉각, 가스터

어빈의 날개 및 로켓 노즐의 냉각등 과학기술의 넓은 분야에 걸쳐 많은 연구와 관심의 대상이 되어왔다.

상변화를 갖는 다공물질내의 열전달 현상에 관한 연구는 지난 20여년간 활발히 진행되어 왔으나 이들 연구의 대부분은 상변화가 일어나는 영역을 아주 얇은 하나의 경계면(interface)으로 가정하고 증기와 액체영역을 구분하여 연구가 이루어졌으며^(1,2) 상변화시 나타날 수 있는 증기와 액체가 공존하는 2상영역(two-phase zone)에 관한 연구는 그다지 많지 않다. 다공물질내의 2상영역에 관한 초기연구는 대체로 지열에너지의 이용과 관련한

* 정희원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

** 연세대학교 대학원

*** 정희원, 울산대학교 공과대학 기계공학과

하부가열(bottom heating)의 경우인 데 1968년 Donaldson⁽³⁾은 밀도차에 의한 증기와 액체의 상호 역흐름(counter-current flow)의 자연순환을 갖는 열전달 메카니즘을 연구하였으며 그 후 Bau와 Torrance⁽⁴⁾, Sondergeld와 Turcotte⁽⁵⁾등은 각각 실험 및 흐름의 가시화를 통하여 이러한 흐름특성을 갖는 포화상태의 등온영역을 관찰하였다. 이와 같은 영역은 사실상 증기코어(vapor core)와 위크(wick)로 이루어진 기존 열파이프와 전열특성이 유사한 것으로서 이에 근거하여 최근 다공물질을 이용한 열파이프에 대한 관심이 고조되고 있다. 왜냐하면 다공물질을 열파이프로 이용하는 경우 속이 빈 기존 열파이프와 비교하여 구조 및 제작이 간단하며 기계적 강도가 강한 것이 장점이기 때문이다. 한편 자연대류의 영향이 배제되는 상부가열(top heating)의 경우에 대한 2상영역의 존재 가능성은 기본적으로 모세관력(capillary force)의 구배에 기인하는 데 최근 Ogniewicz와 Tien⁽⁶⁾은 이 모델에 대한 열파이프 현상을 이론적으로 제시하였다. Udell⁽⁷⁾은 이와 관련한 이론 및 실험적 연구를 통하여 모세관력의 차이에 의한 2상영역을 관찰하였으며 2상영역의 길이는 열유속에 반비례함을 보였다. 그러나 Udell의 연구는 2상흐름영역내의 모세관압력을 적절히 정의하지 못하였으며 실험결과 또한 부족하여 그의 이론결과를 충분히 뒷받침하지 못하고 있다. Udell의 결과에 의하면 열유속의 증가에 따른 2상영역 길이의 감소는 전체계의 유효열전도율을 감소시킴으로서 계의 열전달성능을 떨어뜨리는 원인이 된다.

본 연구에서는 1차원 열흐름하에서 상부가 가열된 다공물질내의 열파이프 현상과 관련하여 2상영역의 존재와 그 길이에 영향을 미치는 인자들을 실험적으로 관찰, 조사하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며 실험용기에 대한 상세도는 Fig. 2와 같다. 시험용기는 내경 70mm, 길이 290mm인 스테인레스 강관을 사용하였으며 용기의 상단과 하단에는 각각 2개의 탭을 내어 이를 출(입)수구와 압력구로 각각 사용하였다. 다공물질로 채워진 용기의 상·하단에는 표준판(standard plate)으로서 3mm 두께

인 테프론 원판을 설치하였으며 이 판의 양단간의 온도차로부터 열유속을 측정하였다. 온도의 측정은 용기내부에 심어진 18개소의 Copper-Constantan 열전대를 통하여 이루어졌으며 각 부위의 온도는

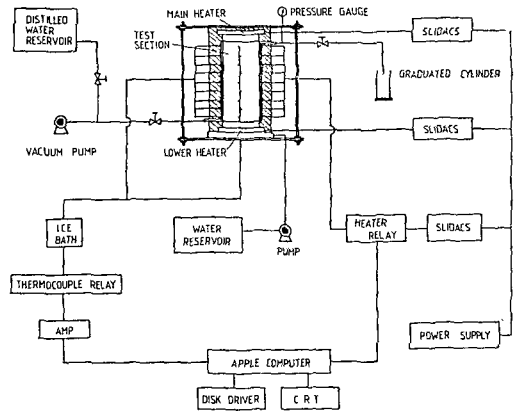
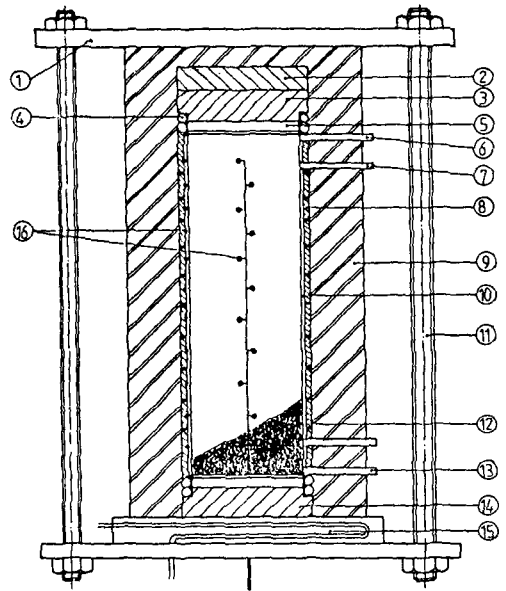


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



- ① Bakelite panel
- ② Main heater
- ③ Upper rod
- ④ O-ring
- ⑤ Standard bar
- ⑥ Vapor outlet
- ⑦ Pressure tap
- ⑧ Guard heater
- ⑨ Ceramic insulation
- ⑩ Pyrex glass
- ⑪ Steel rod
- ⑫ Porous media
- ⑬ Water inlet
- ⑭ Lower rod
- ⑮ Cooling unit
- ⑯ Thermocouples

Fig. 2 Test section

Table 1 Physical properties of porous media

Property Porousmedia	Brain size		Porosity	Permiabilitymeasured $K(m^2)$
	Mesh	AV.DIA.(mm)		
Glass	16~20	0.9	0.38	1.00E-10
Copper	12~24	1.0	0.37	2.40E-10
Copper	60~100	0.2	0.7	2.49E-10
Sand	20~28	0.72	0.41	9.00E-11
Sand	28~35	0.51	0.42	3.49E-11
Sand	48~60	0.27	0.43	2.30E-11
Sand	60~100	0.2	0.476	1.21E-11

마이크로 프로세서를 이용하여 모니터에 전시되도록 하였다. 한편 반경방향의 열손실을 방지하기 위하여 용기내벽에 두께 2mm인 테프론판을 둘렀으며 용기외벽에는 철-크롬 테이프를 감은 보조히터(guard heater) 설치하고 30mm 두께로 세라믹 단열재를 감쌌다. 시험용기의 상단 출수구에는 미압계와 진공펌프를 연결하였으며 하단 입수구 쪽에는 마노메타를 설치하였다. 한편 시험용기의 하단에는 냉각기(cooling unit)를 부착하여 냉각수의 순환에 따른 1차원 열흐름을 촉진하였다. 실험에 사용된 다공물질은 모래(20~28mesh, 28~35mesh, 48~60 mesh, 60~100mesh), 유리(16~20mesh), 구리(12~24mesh, 60~100mesh)등을 이용하였으며 실험유체는 증류수를 사용하였다.

2.2 실험방법

실험은 열유속이 $300w/m^2 \sim 2,000w/m^2$ 의 범위에서 행하여졌으며 시스템이 정상상태에 도달하기까지는 대략 8~9시간이 소요되었다. 실험에서 사용한 다공물질의 제원은 Table 1과 같으며 실험의 주요 순서와 방법은 다음과 같다.

(1) 실험에 앞서 공극율(porosity)과 침투율(permeability) 측정실험을 행한다. 침투율의 측정은 다공물질이 채워진 용기내부로 일정량의 유량을 통과시켰을 때 용기의 상단과 하단간의 압력차를 측정함으로써 Darcy 방정식으로부터 침투율 K 를 구하며, 공극율은 일정량의 작동유체가 담긴 비이커에 다공물질을 채워넣어 수면에 다공물질이 완전히 젖게 되는 체적에 대한 처음의 작동유체 체적의 비로 계산한다.

(2) 실험은 먼저 다공물질로 가득 채워진 시스템 내부를 진공펌프를 이용하여 $-500mmHg$ 정도로

진공시킨 후 증류수를 주입하여 완전히 채운다.

(3) 주히터와 보조히터를 작동시켜 증류수의 증발이 일어나게 하며 용기의 상단에 부착된 미압계(1,000mmAq)의 압력이 대기압을 약간 넘는 100~200mmAq의 압력범위에서 유지되게 한다. 이때 보조히터는 단열을 유지하기 위한 것으로 같은 위치의 다공물질의 중심부와 용기외벽의 온도가 '0'이 되도록 애플 컴퓨터의 PIO명령에 의하여 릴레이를 통한 on-off 제어가 이루어지도록 한다. 한편 외부로 빠져나온 증기는 응축되어 메스실린더에 수집된다.

(4) 시스템이 정상상태에 도달할 때까지 일정시간 간격으로 다공물질 내부의 온도분포 및 압력을 측정한다. 이때 정상상태의 여부는 압력계 및 내부 온도분포, 특히 액체영역의 선형적인 온도로부터 판단하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 온도분포

본 실험의 결과 정상상태에서 관찰된 시스템 내부의 선형적인 온도분포는 Fig. 3과 같다. 그림에서 보면 열유속과 작동유체의 적절한 조건하에서 서로 다른 3개의 영역이 나타남을 알 수 있다. 즉 상단부분의 기울기가 크고 선형적인 온도분포의 증기영역과 하단부분의 기울기가 완만한 선형적인 온도분포의 액체영역, 그리고 이 두 영역 사이의 포화온도에서 $\pm 1^\circ C$ 이내의 거의 등온인 영역이다. 따라서 상단과 하단부분에는 1차원 열유속하에서 유동이 전혀 없는 정지상태의 전도열전달이 지배적인 과열증기 및 과냉액체영역이 존재함을 알 수 있으며, 그 사이의 등온영역은 포화상태의 증기와 액

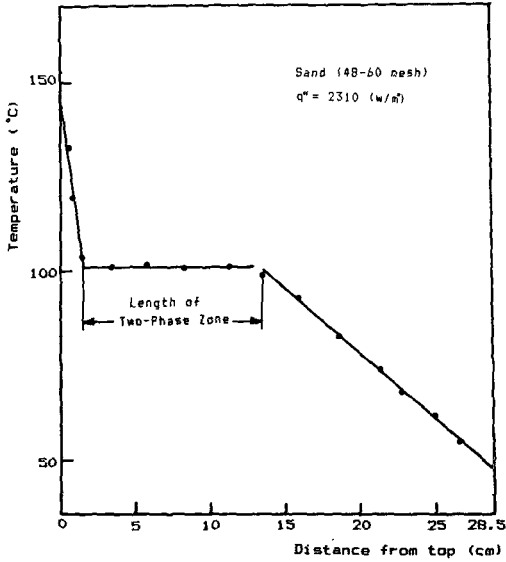


Fig. 3 Temperature profile (sand)

체가 공존하는 2상영역을 알 수 있다. 이러한 2상영역은 액체와 증기의 증발 및 응축에 따른 잠열 교환이 이루어지는 상호 역흐름의 대류가 지배적인 영역으로 이는 기존의 열파이프와 동일한 열전달 메커니즘을 갖는다. 즉 본 실험모델의 경우와 같이 자연대류의 영향이 배제된 다공물질내의 열파이프 현상은 2상영역내의 증기압력 및 모세관압력의 구배에 기인하며 이들은 각각 증기와 액체가 상호 역흐름을 유지할 수 있는 구동력(driving force)으로 작용하고 있다. Fig. 4는 이러한 열전달 메커니즘에 대하여 물리적 설명할 수 있는 다공물질내의 압력분포를 나타낸 것이다.

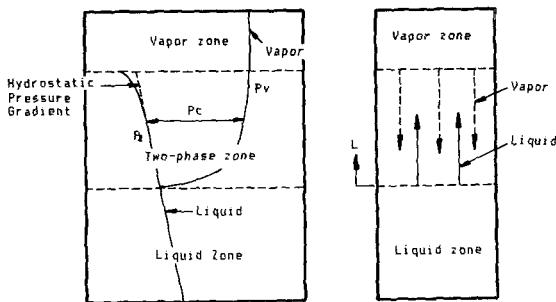


Fig. 4 Representation of sand column pressure profile

3.2 열파이프 현상

다공물질로 가득 채워진 상부가열 시스템에 있어서 2상영역의 발생은 기본적으로 다공물질의 불균칙한 배열 및 형상에 따른 불균일한 기공분포(nonuniform pore distribution)에 기인한다. 즉, 상변화로 인해 열팽창된 증기가 증기의 압력차에 의해 모세관력이 상대적으로 작은 과냉액체영역의 보다 넓은 기공안으로 침투해 들어가며 이 과정에서 증기와 액체가 공존하는 2상영역이 나타난다. 증기의 하향흐름은 침투해 들어가던 증기가 응축되어 그 지점의 액체의 압력과 같아질 때까지 계속되며 동시발생적으로 보다 좁은 기공안에 남아있는 액체의 상승작용이 생겨난다. 액체의 상향흐름은 다공질내의 증기와 액체의 압력차, 즉 모세관압력의 차이에 의한 모세관구동흐름(capillary-driven flow)으로 인하여 액체의 흐름이 연속조건(continuous or funicular condition)하에서 상변화가 일어나는 상단 경계면의 최대모세관압력이 존재하는 지점까지 계속된다. 또한 이 과정에서 증기와 액체는 상호간에 열적평형을 이루며 2상영역의 내부에서는 상변화가 일어나지 않고 상·하단의 얇은 경계면에서 증발과 응축이 각각 일어나는 것으로 고려할 수 있다.

3.3 2상영역의 길이

Udell⁽⁷⁾은 2상흐름에 대한 확장된 Darcy 방정식으로부터 다음과 같은 2상영역의 길이에 대한 무차원 미분방정식을 유도하였다.

$$\frac{d\delta}{ds} = \frac{df/ds}{1 + \omega(1/K_s + \beta/K_l)} \quad (1)$$

여기서 δ , ω , f 는 각각 무차원 2상영역의 길이, 열유속 및 모세관압력이며 s 는 축적된 포화도(scaled saturation)이다. K_s , K_l 은 각각 0에서 1 사이의 값을 갖는 증기 및 액체의 상대침투율(relative permeability)이다. 일반적으로 모세관압력과 상대침투율은 포화도만의 함수로 표시되며 이들 값은 주로 경험식에 의존한다. 식(1)은 Runge-Kutta 연산방식에 의해 쉽게 풀려질 수 있는데 분모의 열유속 ω 는 에너지 및 연속식으로부터 얻어진 유체의 질량유속을 대표하는 것으로 부착된 관흐름과 함께 들쭉함은 다공물질 입자에 대한 증기와 액체의 마찰에 의한 압력손실의 합을 나타내며 첫쭉함은 중력의 영향을 나타낸다. Udell은 주어진 다공물질에 대하여 모세관압력 $f(s)$ 가 열

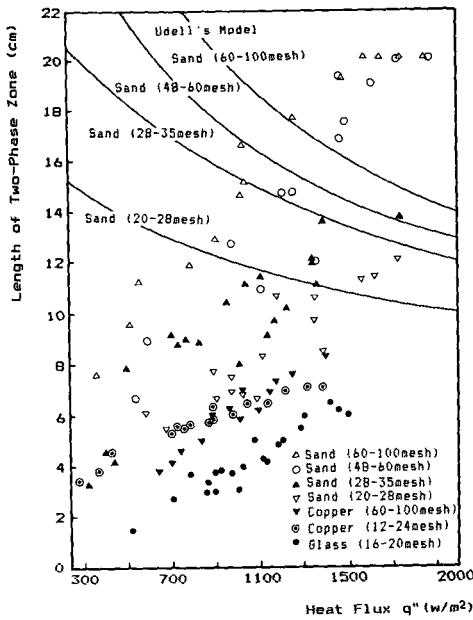


Fig. 5 Two-phase zone length vs. heat flux

유속 ω 에 관계없이 포화도 s 에 대해 항상 일정한 값을 갖는 경우 2상영역의 길이 δ 는 식(1)로부터 포화도의 구간 $0 \rightarrow 1$ 에서 ω 가 증가함에 따라 감소함을 보였으며 실험을 통하여 이를 뒷받침하였다. 그러나 그의 실험데이터는 2~3개 정도로서 이러한 경향을 확신하기에 불충분하다.

Fig. 5는 본 실험의 결과 나타난 열유속의 변화에 따른 2상영역의 길이를 각 다공물질에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 표시된 2상영역의 길이는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 증기 및 액체영역의 선형적인 온도분포가 100°C 인 포화온도와 만나는 점 사이의 거리로서 외삽법(extrapolation)에 의해 구하였다. Fig. 5에서 보면 다공물질 입자의 크기가 작을수록 2상영역의 길이는 동일한 열유속하에서 상대적으로 크게 나타났는데 이는 모세관력의 영향이 중요하기 때문에 대체로 침투율의 크기에 의존한다. 이러한 경향은 Udell의 결과와 일치한다. 그러나 2상영역의 길이는 본 실험의 범위내에서 열유속이 증가함에 따라 일반적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 이는 Udell의 결과와 상반된 경향을 나타낸다. 그리고 2상영역의 길이는 40~60 mesh의 모래의 경우에 열유속이 대략 1500w/m^2 정도 이상에서, 또한 16~20mesh의 유리의 경우는 열유속이 1150w/m^2 정도 이상의 범위에서 각각

그 증가량이 매우 완만하게 나타났으며 이 범위의 Udell의 이론치와 근사한 값을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 비교적 많은 실험데이터로부터 얻어진 본 실험 결과를 고찰하여 볼 때 다음과 같은 이유로 해석되어졌다.

(1) Udell은 식(1)에서 $f(s)$ 에 대한 값으로 'Leverett J함수⁽⁸⁾'를 사용하였는데 이는 거의 정적 조건하에서 얻어진 다공물질내의 모세관압력과 액체포화도(s)간의 일반적인 관계식을 나타낸 것으로 다음식과 같다.

$$J(s) = \frac{P_c}{\delta} \left(\frac{K}{\phi} \right)^{1/2} \quad (2)$$

여기서 P_c 는 모세관압력, δ 는 표면장력, ϕ 는 공극율, K 는 절대침투율(absolute permeability)로서 다공물질의 구조에 의존한다. 이러한 J함수는 모세관의 자기이력(capillary hysteresis)에 따라 Fig. 6과 같이 배수곡선(drainage curve)과 흡수곡선(imbibition curve)으로 나누어 지는데 이는 일반적으로 잉크병효과(ink bottle effect)에서 볼 수 있듯이 다공물질의 입자표면에 젖은 액체의 접촉각(contact angle)의 차이에 기인한다. 여기서 접촉각은 증기-액체 경계면이 고체표면과 이루는 것이다. Udell은 식(1)을 계산함에 있어서 무차원 모세관압력, 즉 J함수에 대한 식으로 흡수곡선의 데이터를 상호관계(correlation)시킨 다음과 같은 다항식을 사용하였다.

$$f(\bar{s}) = 1.417(1-\bar{s}) - 2.120(1-\bar{s})^2 + 1.263(1-\bar{s})^3 \quad (3)$$

여기서 \bar{s} 는 유효포화도(effective saturation)로서

$$\bar{s} = \frac{s - s_{ir}}{1 - s_{ir}} \quad (4)$$

로 정의되며 잔여포화도(residual saturation) s_{ir} 은 액체가 불연속상태로 천이되는, 즉 연속상태가 이루어지는 최소포화도이다. 식(3)은 Fig. 6의 곡선 ①에 해당하며 여기서 최대값 $f(0) = 0.56$ 은 그림에서 대략 잔여포화도 $s_{ir} = 0.17$ 에 해당하는 $J(s)$ 의 값이다. 따라서 이 잔여포화도의 값은 본 실험의 질량연속 조건을 만족하는 최소포화도로 규정할 수 있다. 그러나 J함수는 거의 정적 조건하에서 얻어진 것으로 본 실험의 경우와 같이 2개의 상이 상호 역흐름을 갖는 동적조건하에서는 곡선 ① 혹은 곡선 ②의 적용이 모세관력의 영향이 지배적인 문제의 해를 구함에 있어서 상당한 오차를 수반할 것으로 판단된다. 왜냐하면 증기와 액체가

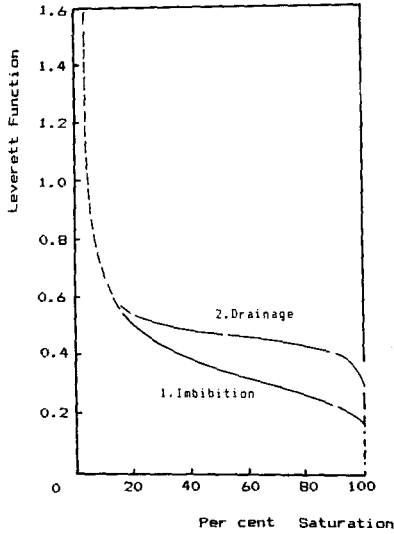


Fig. 6 J-S diagram

상호 역흐름인 동적조건하에서는 2상간의 상대속도에 따른 접촉각의 변화를 가져오기 때문이다. 즉, 열유속의 증가에 따른 2상간의 상대속도의 증가는 접촉각의 감소를 가져오며 이는 $J(s)$, 즉 모세관 압력의 증가로 나타난다.

따라서 본 연구모델의 유동형태에 대하여 J 함수는 곡선 ① 과 ② 중 어느 한쪽에 해당하지 않고 이들 곡선사이의 값을 가질 것으로 판단된다. 본 실험에서는 모세관압력의 측정이 불가능하므로 이와같은 현상을 관찰하기 위하여 Fig. 4와 같은 압력분포를 가정하여 상·하단의 증기 및 액체영역의 압력을 측정된 결과 열유속의 변화에 따른 증기-2상영역의 상경계면에서의 최대모세관압력을 각 다공물질에 대하여 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 보면 열유속이 증가함에 따라 최대모세관압력은 점차 증가함을 알 수 있으며 일정한 열유속이상의 실험범위에서는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 따라서 열유속이 증가하는 경우 상대속도의 변화에 따른 모세관압력의 변화량이 상대적으로 증가하여 df/ds 의 증가분이 하부의 열유속의 증가에 따른 영향보다 더 크게 나타날 때 2상영역의 길이는 증가할 것을 해석된다. 그러나 이러한 경향은 열유속이 일정값 이상 증가하여 2상영역내의 모세관압력이 포화도에 대하여 큰 변화를 보이지 않게 되면 그 증가량은 완만해지고 2상영역의 길이는 점차 감소할 것으로 예상된다. 즉, 이는 기존의 열파이프

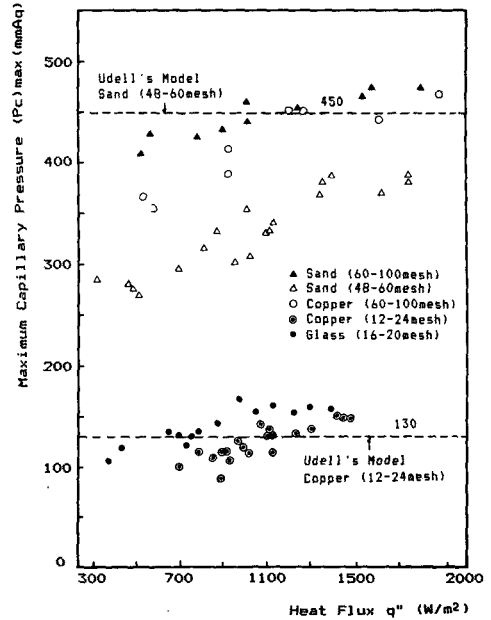


Fig. 7 Maximum capillary pressure vs. heat flux

에서 나타나는 모세관한계(capillary limit)로 고려될 수 있기 때문이다.

(2) 상변화가 일어나는 2상영역의 상하단의 경계면에서는 각각 증발과 응축열로 인하여 포화도의 도약(jump) 현상이 나타나는데 이들 지점에서의 포화도는 식(1)의 적분구간과 관련하여 중요한 의미를 갖는다. 그러나 2상영역의 상단경계면에서 나타나는 최소포화도는 앞에서 언급한 바와 같이 대체로 잔여포화도로 고려할 수 있으나 하단경계면에서의 포화도는 불확실하다. 이러한 하단경계면에서의 포화도, 즉 최대포화도는 본 실험에서 측정된 비교적 낮은 열유속의 범위에서 나타난 2상영역의 길이가 Udell의 이론치와 상당한 차이를 나타내는 이유의 하나로 생각된다. 즉, Udell은 J - S 선도로부터 하단경계면에서의 최대포화도를 $S=1$ 로 고려하여 열유속에 관계없이 항상 일정한 것으로 간주하였으며 응축에 따른 포화도의 도약현상은 고려하지 않았다. 따라서 이는 상변화가 일어나는 본 실험조건에서 볼 때 부적절한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이를 조사하기 위하여 다공물질을 빠져나온 작동유체의 양으로부터 2상영역 내부의 평균 액체포화도를 산출 하였으며 그 결과 2상영역의 길이에 대한 이 영역내의 평균액체포화도를 Fig. 8에 나타내었다. 2상영역내의 평균액체포화도는 증

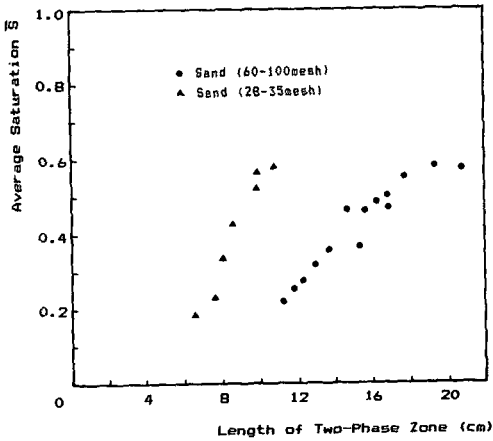


Fig. 8 Length of two-phase zone vs. average saturation of two-phase zone

기의 비체적이 액체에 비해 매우 크기 때문에 증기 영역의 작동유체의 양을 무시할 수 있으며 따라서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{S} = \frac{\phi V_T - [\phi V_L + V_{out}]}{\phi V_i} \quad (5)$$

여기서 V_T , V_L 및 V_i 는 각각 다공물질이 담긴 전 체용기의 체적, 액체영역 및 2상영역의 체적이며, V_{out} 은 밖으로 빠져나온 응축된 작동유체의 체적이

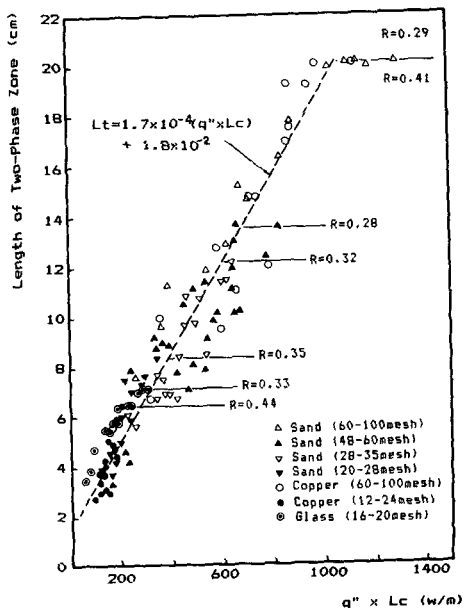


Fig. 9 ($q'' \times L_c$) vs. L_t ($R=L_t/L_c$)

다. 그림에서 보면 2상영역의 길이는 평균 액체포화도가 작은 경우 작게 나타남을 알 수 있는데 이는 2상영역의 하단경계면에서의 포화도, 즉 최대포화도의 감소에 따른 식(1)의 적분구간의 감소로 인하여 2상영역의 길이가 감소함을 의미한다.

한편 Fig. 9는 본 실험결과 각 다공물질에 대한 실험치를 하나의 그래프에 표시한 열유속과 수력학적 모세관높이(hydrostatic capillary height)의 곱($q \cdot l_c$)에 대한 2상영역의 길이를 나타낸 것으로서 그림에서 보면 이 값들은 대체로 하나의 직선위에 서로 잘 일치하고 있다. 따라서 이를 상호 관련시킨 결과 2상영역의 길이는 근사적으로 다음과 같은 단순한 관계식으로 표시될 수 있었다. 즉,

$$l_t = A(q \cdot l_c) + B, \quad \dot{q} \leq \frac{1}{A} \left(\bar{C} - \frac{B}{l_c} \right) \quad (16)$$

여기서 상수 A , B 는 각각 $1.6 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{w}$ 와 $1.8 \times 10^{-2} \text{m}$ 이며 상수 \bar{C} 는 구리의 경우 0.43, 유리와 모래의 경우 약 0.31이다. 이때 그림에서 나타난 R 은 수력학적 모세관높이에 대한 본 실험에서 나타난 최대 2상영역의 길이의 비이다.

4. 결 론

본 연구는 자연대류의 영향이 배제된 1차원 정상 상태에서 상부가 가열된 다공물질내의 열파이프 현상을 실험적으로 조사하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

2상영역의 길이는 동일한 열유속하에서 다공물질 입자의 크기가 작을수록 증가하며 비교적 작은 열유속의 범위에서 열유속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 그러나 열유속이 일정한 값 이상 증가하면 2상영역의 길이는 그 증가량이 매우 완만하게 나타나며 제한된 열유속의 범위에서 2상영역의 길이는 열유속과 수력학적 모세관높이의 곱에 비례함을 보였다. 즉,

$$l_t = A(q \cdot l_c) + B, \quad \dot{q} \leq \frac{1}{A} \left(\bar{C} - \frac{B}{l_c} \right)$$

여기서 A , B 는 각각 $1.6 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{w}$ 와 $1.8 \times 10^{-2} \text{m}$ 이며 \bar{C} 는 구리의 경우 0.43, 유리와 모래의 경우 약 0.31이다.

후 기

본 연구는 1986년도 전반기 한국과학재단 차관연

구비의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Koh, J. C. Y, and Del Casal, E.P., 1968, "Two-Phase Flow in Porous Matrices for Transpiration Cooling", *Dev. Mech.*, Vol. 4, pp.1527~1541.
- (2) Rubin, A., and Schweitzer, S., 1972, "Heat Transfer in Porous Media with Phase Change", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp.43~60.
- (3) Donaldson, I. G., 1968, "The Flow of Steam-Water Mixture through Permeable Beas; A Simple Simulation of a Natural Undisturbed Hydrothermal Region", *N. Z. J. Sci.*, Vol. 11, pp.3~23.
- (4) Bau, H. H., and Torrance, K. E., 1982, "Boiling in Low Permeability Porous Materials", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, pp.45~55.
- (5) Sondergeld, C. H., and Turcotte, D.L., 1978, "Flow Vizualization Studies of Two-Phase Thermal Convection in a Porous Layer", *Pure. Appl. Geophys.*, Vol. 117, p.321~330.
- (6) Ogniewicz, Y., and Tien, C.L., 1979, "Analysis of the Heat Pipe Phenomenon in Porous Media", Paper 79-1093 AIAA 14th Thermophysics Conference, Orlando, Florida, June.
- (7) Udell, K. S., 1983, "Heat Transfer in Porous Media Heated form Above with Evaporation, Condensation and Capillary Effect", *J. Heat Transfer*, Trans. ASME, Series C, Vol. 105. PP.485~492.
- (8) Leverett, M. C., 1941, "Capillary Behavior in Porous Solids", *AIME Trans.*, Vol. 15z42, pp. 152~169.