

<論 文>

증발분출냉각의 열전달 특성에 관한 실험적 연구

이진호* · 남궁규완** · 김홍제*** · 주성백***

(1988년 2월 20일 접수)

Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics of Evaporative Transpiration Cooling

Jinho Lee, Kyu-Wan Namkoong, Hong-Jea Kim and Sung Baek Joo

Key Words : Evaporative Transpiration Cooling(증발분출냉각), Heat Transfer Characteristics(열전달특성), Evaporation Zone(증발영역), Surface Temperature(표면온도), Flow Stability(유동안정성)

Abstract

Heat transfer characteristics of evaporative transpiration cooling was investigated experimentally in the range of coolant mass flux, $0.002\text{kg/m}^2\cdot\text{sec} \sim 0.015\text{kg/m}^2\cdot\text{sec}$. Glass beads, sand and copper particles were used as porous media and distilled water was used as a coolant. The existence of evaporation zone was confirmed on this experimental conditions and its length increases with increasing particle size and with decreasing mass flux. In order to get the low surface temperature, porous materials with high thermal conductivity is preferred when the particle sizes are same, and small particles with low porosity is effective in case of the same material. Due to the relatively small coolant mass flux, evaporative transpiration cooling system could be stable by the capillary effect.

1. 서 론

다공물질내의 액체의 증발은 다공물질이 비체적에 비해 비표면적이 매우 클 뿐만 아니라 액상의 유체가 증발되어 과열증기가 되는 과정에서 높은 열흡수용량을 갖기 때문에 여러가지 열전달장치 및 열보호 시스템과 관련하여 지금까지 많은 연구와 관심의 대상이 되어 왔다.

일반적으로 분출냉각(transpiration cooling)이란 기계장치의 수명을 연장하기 위하여 다공물질의 기

공 사이로 액체 또는 기체상태의 냉각제를 연속적으로 공급하여 고온에 노출된 장치의 표면을 적정 온도 이하로 냉각시킴으로써 표면을 열적보호하는 방법을 말하며 가스터어빈의 날개, 로켓트 노즐 및 우주선의 원추형 두부등의 냉각에 널리 응용이 되고 있다^(1,2). 특히, 증발분출냉각(evaporative transpiration cooling)은 액체상태의 냉각제를 주입하여 증발시킴으로써 상변화에 따른 잠열교환의 효과를 이용하는 방법으로 단상(single phase)의 냉각제를 사용하는 경우보다 훨씬 효과적일 뿐만 아니라 냉각응용에 요구되는 냉각수의 양을 상대적으로 줄일 수 있다.

분출냉각에 관한 초기연구는 주로 냉각제가 기체상태인 경우^(3,4)에 대하여 행하여졌으며 증발분출냉각에 관한 연구는 1960년대 후반부터 활발히 이루어

*정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

**정회원, 울산대학교 공과대학 기계공학과

***연세대학교 대학원

어져 왔다. Koh와 Del-Casal⁽⁶⁾은 다공물질내의 유체의 유동을 액체영역과 증기영역으로 나누어 각 영역에서의 온도분포와 압력 분포를 해석하였으며 실험을 통하여 증발분출냉각계에 있어서 유동의 불안정성(*instability*)현상이 나타남을 발견하였다. Rubin과 Schweitzer⁽⁶⁾는 증기와 액체영역의 경계면을 얇은 하나의 면으로 가정하여 온도분포 및 상변화위치에 영향을 주는 인자들을 조사하였으며 정상상태에 대한 엄밀해를 구하였다. 그러나 이들은 유체와 다공물질간의 열적평형을 가정하였으며 냉각수의 상변화영역을 하나의 면으로 간주하여 2개의 상, 즉 냉각수가 증발하는 과정에서 나타나는 액체와 증기가 공존하는 유한한 두께의 증발영역(*evaporation zone*)의 존재가능성에 대해서는 고려하지 않았다. Yang⁽⁷⁾은 다공층내의 유체와 다공물질간의 온도차를 고려함으로써 다공층내의 유체의 흐름을 액체영역과 비등영역(*boiling region*)으로 나누었으며 이로부터 각 영역의 온도분포 및 상변화위치에 대한 수치해를 구하였다. 그러나 그는 증발이 일어나는 2상영역의 존재가능성은 제시하였으나 다공물질을 떠나는 냉각수의 상태를 포화증기로 제한하여 실제의 경우 나타나는 과열증기영역에 대해서는 고려하지 않았다.

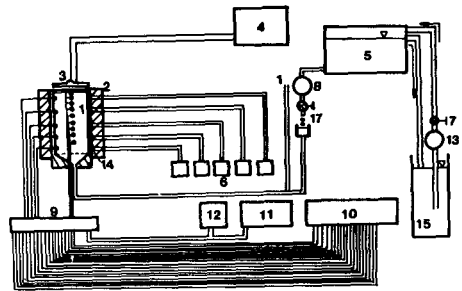
한편 증발분출냉각에 관한 실험적 연구는 Koh와 Del-Casal⁽⁶⁾, Kikkawa⁽⁸⁾등에 의해 이루어졌으나 이들이 사용한 다공물질층의 두께는 10mm 이하의 얇은 모델의 경우로서 다공층내부의 온도분포 및 상변화위치에 대한 연구가 충분하지 않으면 특히 그상이 존재하는 증발영역의 존재에 대해서는 명확히 조사되지 않았다. 그러나 이러한 증발영역의 발생은 증발분출냉각계를 설계함에 있어서 냉각수의 완전한 증발에 필요한 다공층 두께의 확립은 물론 다공층내의 온도분포 및 냉각수량의 최소화등과 관련하여 계의 열전달특성에 중요한 변수로 작용하므로 이에 대한 연구가 절실히 요청되고 있다.

따라서 본 연구에서는 증발분출냉각장치의 설계 및 이의 응용을 위하여 두께가 비교적 두꺼운(120mm) 다공물질층을 모델로 사용하여 증발분출냉각에 관한 열전달특성을 실험적으로 조사하였다. 실험은 열과 유체의 흐름이 1차원 정상상태에 대하여 증발영역의 발생과 그 길이 및 상변화위치, 그리고 다공물질층의 표면온도등에 영향을 미치는 인자들을 조사하며, 아울러 냉각수의 상변화시 다공층내 냉각수 유동의 안정성 여부를 관찰하였다.

2. 실험

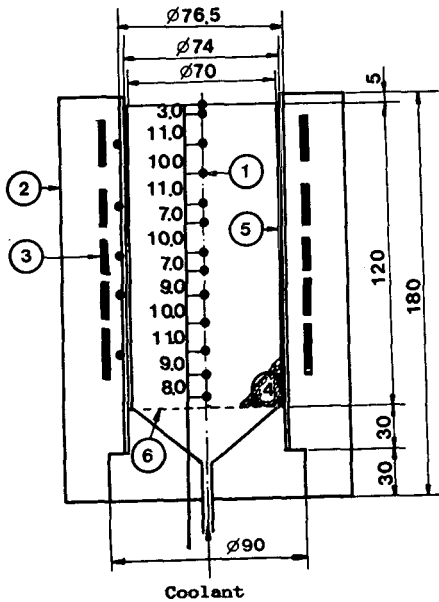
2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 장치는 크게 시험용기와 냉각수 주입장치 및 온도측정 장치로 나눌 수 있으며 전체 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 시험용기에 대한 상세도로써 용기는 내경 74mm, 길이 150mm인 스테인레스 강관으로 이루어졌으며 그 안에 다공물질을 촘촘히 담은 두께가 120mm인 다공층을 구성하였다. 이때 수직방향의 1차원 열흐름을 유지하기 위하여 용기 내벽에 2mm 두께의 테프론판을 부착하였으며 용기외벽에는 철-크롬 테이프를 감은 5개의 보조히터를 설치하고 30mm 두께의 세라믹 단열재를 감쌌다. 실험에서 사용한 열원은 200V-300W 규격의 적외선히터로 다공물질 표면의 수직상단 20mm 되는 위치에 고정하여 설치함으로써 외부열입력을 복사에 의한 열전달이 되도록 하였다. 온도의 측정은 용기내부의 중심부를



1. Test section
2. Ceramic insulation
3. Infrared heater
4. Slidacs(220V)
5. Constant water height reservoir
6. Slidacs(110V)
7. Water control valve
8. Flow meter
9. Thermocouple junction
10. Data logger
11. Pen-recorder
12. Ice bath
13. Water pump
14. Guard heater
15. Water reservoir
16. Manometer
17. Water injection system

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for transpiration cooling



1. Thermocouples 4. Porous material
 2. Ceramic insulation 5. Teflon plate
 3. Guard heater 6. Sieve screen
Fig. 2 Schematic diagram of test section

따라 약 1cm 간격으로 십어진 13개의 고정열전대 (직경 0.12mm Chromel-Alumel)를 통하여 이루어졌다. 각 지점의 온도는 데이터-로거를 이용하여 디지털 방식으로 즉시 기록되도록 하였으며, 동시에 펜-레코더와 연결하여 시간에 따른 특정위치의 온도변화를 연속적으로 기록할 수 있도록 하였다. 냉각수는 시험용기의 중앙하단으로부터 안내관을 통하여 다공층 내부로 균일하게 공급되도록 하였으며, 냉각수의 질량유속을 일정하게 유지하기 위하여 Fig. 1에서 17로 표시된 냉각수 주입장치를 사용하였다. 즉, 이는 수두가 항상 일정하게 유지되는 수조를 측정부 상단 50cm되는 위치에 설치하고 이 수조로부터 조절밸브를 사용하여 증류수의 액적을 이동이 가능한 수집용기 위로 균일하게 떨어뜨려 냉각수의 주입 원동력을 수두차에 의한 압력이 되도록 하였다. 한편 시험용기 하단 입수구에서의 압력 및 다공층 내부 압력의 측정용기의 벽에 설치된 4개의 마노메타를 통하여 이루어졌다.

2.2 실험방법

실험은 다공물질로 채워진 수직계 내부로 냉각수를 주입하여 상부가 가열된 외부열입력 조건하에서

정상상태의 내부 온도분포를 측정함으로써 증발영역의 발생 및 그 길이를 관찰하였다. 실험의 순서와 방법은 다음과 같다.

(1) 본 실험에 앞서 공극율 측정실험을 행한다. 공극율은 전체 다공물질층의 체적에 대한 기공이 차지하는 체적의 비로서, 일정량의 유체가 담긴 비이커에 다공물질을 채워넣고 수면에 다공물질이 완전히 젖게되는 체적을 측정함으로써 계산하였으며 측정오차는 약 2% 이내였다.

(2) 실험은 먼저 다공물질의 표면을 평평하게 끌고루 다진 다음 증류수를 연속적으로 공급하여 다공물질층이 완전히 젖게되면 열원인 적외선히터에 적정의 전압(150~190V)을 가한다. 이와 동시에 반경방향의 열손실을 방지하기 위하여 보조히터를 작동시키며 같은 위치의 다공물질층 중심부의 온도와 용기외벽의 온도가 같아지도록 2단계의 가변저항기를 사용하여 보조히터에 가해지는 전압(5V미만)을 조정한다.

본 실험에서 다공질 내부로 실제 투입된 열입력은 열원인 적외선히터에 가해진 전압, 냉각수의 질량유속, 다공물질의 재질등에 따라 달라질 수 있으나 이를 정확히 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 열입력의 측정은 수냉장치를 이용하여 건조한 다공층 내부로 투입된 열전달량을 계산함으로써 행하였다.

(3) 실험이 시작됨과 동시에 데이터-로거를 이용하여 실험의 초기에는 20~30분 간격으로, 실험이 원만히 진행되면 10~20분 간격으로 다공층내 각 지점의 온도를 계속 측정하며, 다공층 내부 압력의 변화는 액체영역에 대하여 용기외벽으로부터 마노메타를 통하여 20~30분 간격으로 측정한다. 다공물질층이 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간은 약 8~9시간이 소요되며, 정상상태의 여부는 다공층 내부의 온도분포 및 주입압력 수두로부터 판단하였다.

실험에서 사용된 다공물질은 모래(14~28mesh, 32~48mesh), 구리(14~20mesh, 32~48mesh) 및 유리(14~20mesh)등이며, 실험은 주어진 다공물질에 대하여 열원에 가해진 전압 및 냉각수량등을 변화시키며 반복 시행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험은 냉각수의 질량유속이 0.002kg/m²·sec

Table 1 Physical properties of porous media

Material	Particle size		Porosity	Thermal conductivity (W/mK)
	Mesh	Mean diameter (mm)		
Glass		1.0	0.38	1.4
Sand	14-20	1.0	0.40	2.8
Sand	32-48	0.4	0.424	2.8
Copper	14-20	1.0	0.37	401
Copper	60-100	0.25	0.65	401

~0.015kg/m²·sec인 범위에서 행하여 졌으며 실험에 사용된 다공물질의 제원은 Table 1과 같다.

3.1 온도분포

Fig. 3은 일정한 열입력하에서 냉각수의 질량유속 변화에 따른 정상상태의 다공물질층 내부의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 냉각수의 증발이 일어나는 적정 범위의 열입력과 냉각수 질량유속의 조건하에서 다공물질층 내부에는 서로 다른 3개의 영역이 존재함을 알 수 있다. 즉, 다공물질층의 상부와 하부에는 각각 온도구배가 급격한 증기영역과 온도구배가 완만한 액체영역이 나타나며 이들 영역 사이에는 포화온도에서 거의 일정한

유한한 두께를 갖는 등온영역이 나타났다. 이와 같은 등온영역의 발생은 상변화가 시작되는 이 영역의 하단 상경계면에서 냉각수의 완전한 증발이 이루어지지 않음을 의미한다. 즉, 이는 액상의 냉각수가 흐름방향을 따라 일정한 길이에 걸쳐 점진적인 증발을 통하여 과열증기상태로 천이되는 과정의 증기와 액체가 혼합된 2상흐름영역임을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 증발분출냉각계의 특정한 냉각조건하에서 일정한 두께의 증발영역이 나타남을 확인할 수 있었다.

3.2 다공층의 표면온도

Fig. 4는 일정한 냉각수 질량유속하에서 길이방

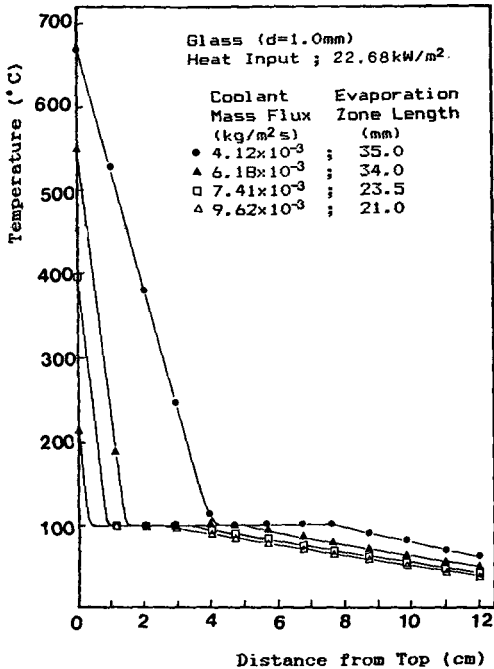


Fig. 3 Temperature profile

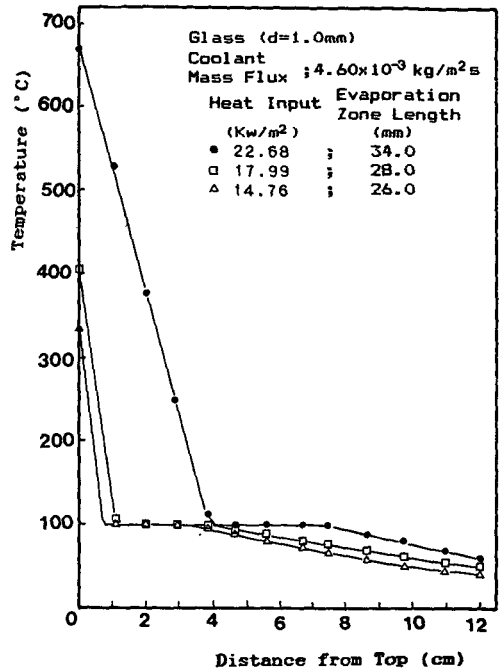


Fig. 4 Temperature profile

향에 따른 다공층 내부의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 다공층의 표면온도는 열입력이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있는데 이는 다공층 내부의 상변화위치와 밀접한 관계를 갖는다. 이러한 현상은 다공층의 상단에 위치한 과열증기영역이 표면으로 부터 점차 내부로 깊숙이 침투해 들어감에 따라 나타난 결과로서 이는 다공물질과 증기로 이루어진 증기영역의 유효열전도율⁽⁹⁾에 기인한다. 즉, 유효열전도율이 낮은 증기영역의 증가는 표면 온도의 급격한 증가를 가져오기 때문이다.

Fig. 5는 일정한 열입력하에서 냉각수 질량유속에 따른 다공층 표면온도의 변화를 각 다공물질에 대하여 나타낸 것이다. 표면온도는 대체로 냉각수 질량유속이 감소함에 따라 100°C 부근에서는 다소 완만하게 증가하나 점차 급격한 온도의 상승현상을 보인다. 한편 이 그림에서 다공물질의 재질에 대한 표면온도의 변화를 살펴보면 공극율과 입자의 크기가 비슷한 유리, 모래, 구리의 경우 표면온도는 일정한 냉각수 질량유속하에서 구리, 모래, 유리의 순으로 크게 나타났는데 이는 일반적으로 다공물질 입자의 열전도율과 관련한다. 즉, 다공물질 입자의 열전도율이 클수록 증기영역의 유효열전도율이 증가하며 이로 인하여 다공층의 표면온도가 낮아지기

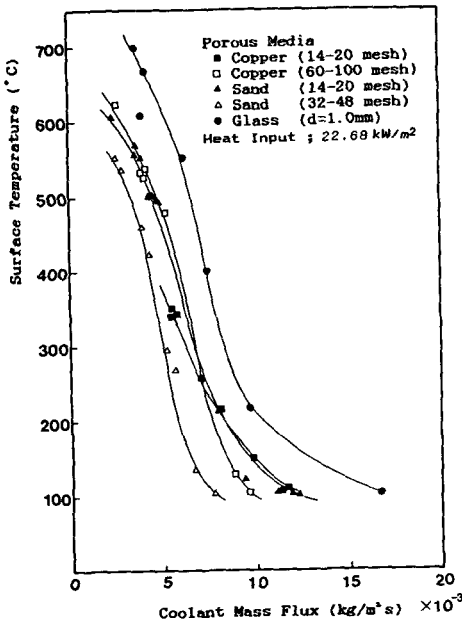


Fig. 5 Relation between surface temperature and coolant mass flux for constant heat input

때문이다. 그러나 열전도율이 비슷한 유리나 모래의 경우를 비교해 보면 냉각수의 질량유속이 감소할수록 다공층의 표면온도는 유리의 경우 훨씬 높게 나타났으며 이는 상변화 경계면의 위치와 관련한다. 즉, Fig. 6은 냉각수의 질량유속에 따른 증기영역의 하단경계면의 위치를 각 다공물질에 대하여 나타낸 것으로 입자의 크기가 비슷한 유리나 모래의 경우 증발이 끝나는 증기영역의 하단경계면의 위치는 유리의 경우가 다공층의 표면으로부터 내부로 더 깊숙히 침투해 들어가기 때문이다. 이같은 현상은 본 실험에서 사용한 다공물질로서 유리는 비교적 구형을 유지함으로써 단위체적당 열전달면적이 모래에 비교하여 작기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 한편 다공물질의 입자크기가 표면온도에 미치는 영향을 살펴보면 일정한 냉각수 질량유속하에서 다공물질의 입자크기가 클수록 표면온도는 높게 나타났다. 이는 다공물질의 입자크기가 작아질수록 냉각수의 흐름통로(flow path)가 좁아지며 단위체적당 열전달면적이 상대적으로 증가함에 기인한다. 이러한 현상은 Fig. 6에서 도시된 구리와 모래의 경우에 대한 실험결과로부터 쉽게 알 수 있는 바와 같이 입자크기가 작은 경우는 열전달면적의 증가로 인하여 원활한 열전달이 이루어지므로 증발이 끝나는 증기영역의 하단경계면의 위치가 상대적으로 다공층의 표면 가까이에 존재하기 때문이다. 그러나 구리입자의 경우에는 냉각수의 질량유속이 대략 $8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 이하인 영역에서 입자크기가 클수록 표면온도가 낮아지는 경향을 보이는데 이는 본 실험에서 사용한 구리입자의 형태가 서로 상이하며 공극율(ϕ)에서 큰 차이(14~18mesh의 경우 $\phi=0.37$, 60~100mesh의 경우 $\phi=0.65$)를 보이기

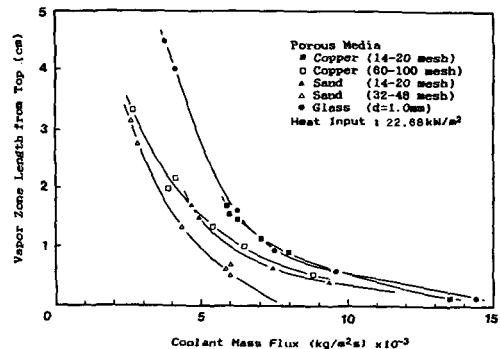


Fig. 6 Relation between vapor zone length and coolant mass flux for constant heat input

때문으로 생각된다. 즉, 다공물질의 공극율이 클수록 열전달면적과 증발영역의 유효열전도율이 감소하므로⁽⁹⁾ $8 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 이하의 작은 냉각수 질량 유속의 범위에서는 열전도에 의한 영향이 입자크기의 감소로 인한 열전달면적의 증가에 따른 대류열 전달의 영향보다 더 지배적으로 작용하기 때문으로 고려된다.

이상의 결과로부터 증발분출냉각계의 냉각효율을 향상시키기 위한 방법으로는 다공물질로서 열전도율이 좋은 재질을 사용하는 것이 효과적이며 다공물질의 재질이 같은 경우에는 입자의 크기 및 공극율이 작은 형상의 다공물질을 선택 하는 것이 더 효율적인 것으로 판단된 것이다.

3.3 증발영역의 길이

Fig. 7은 일정한 열입력하에서 냉각수 질량유속의 변화에 따른 증발영역의 길이를 각 다공물질에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 표시된 증발영역의 길이는 Fig. 3에서 나타나 바와 같이 거의 선형에 가까운 증기 및 액체영역의 온도분포가 거의 100°C 인 포화온도와 만나는 점들 사이의 거리로서 외삽법(extrapolation)에 의해 구하였다. 그림에서 증발영역의 길이는 냉각수의 질량유속이 감소함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며 본 실험의 범위 내에서 다공층 두께의 약 40% 정도(약 5cm)까지 나타났다. 이는 냉각수의 질량유속이 감소함에 따라 대류에 의한 영향이 감소함으로 인하여 냉각수의 완전한 증발이 상대적으로 긴 영역에 걸쳐서 완만하게 이루어짐을 의미한다. 한편 다공물질의 재질 및 입자크기가 증발영역의 길이에 미치는 영향을 살펴보면 동일한 냉각수 질량유속하에서 입자의 크

기가 유사한 다공물질의 경우 증발영역의 길이는 큰 차이를 보이지 않으나 입자크기의 변화에는 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 다공물질의 입자크기가 작은 경우 증발영역의 길이는 감소하는 경향을 보이는데 이는 다공물질의 입자크기가 작을수록 단위체적당 열전달면적의 증가로 인하여 냉각수의 증발이 빨리 일어나기 때문이다. 그러나 60~100mesh인 구리입자의 경우에는 증발영역의 길이가 32~48mesh인 모래의 경우보다 더 크게 나타났다. 이같은 현상은 60~100mesh인 구리입자의 경우가 48~60mesh인 모래의 경우보다 공극율이 훨씬 크기 때문에 입자의 크기가 작음에도 불구하고 증발이 상대적으로 완만하게 일어나기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 냉각수 질량유속의 변화에 따른 증발영역의 길이를 열입력의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보면 동일한 냉각수 질량유속하에서 증발영역의 길이는 일반적으로 열입력이 큰 경우 상대적으로 길게 나타났다. 이같은 현상은 현재로서 명확한 설명이 어려우나 다공물질 내부의 온도 분포에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 다공물질 내의 상변화 경계면의 위치는 열입력이 증가할수록 다공층 내부로 깊숙히 침투해 들어가며 이때 증발영역과 만나는 증기영역의 하단부분에서 과열상태의 액체가 다공물질의 입자와 입자사이에 존재하여 열저항을 감소시킴으로서 증발영역의 온도구배를 완만하게 하는 역할을 하기 때문으로 생각된다. 따라서 냉각수와 다공물질 입자간의 온도차가 상대적으로 감소되어 증발영역에서 증발이 완만하게 일어나는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 9는 증발영역의 길이변화에 따른 다공층의

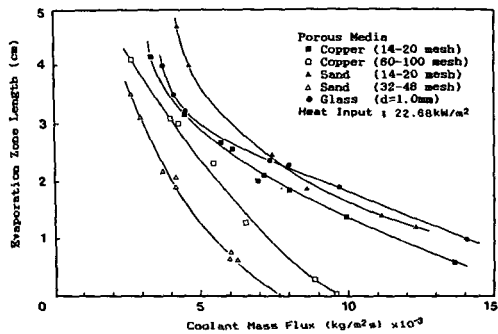


Fig. 7 Relation between evaporation zone length and coolant mass flux for constant heat input

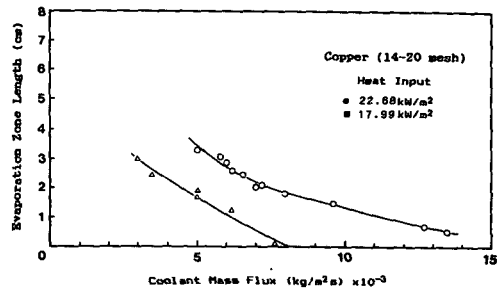


Fig. 8 Relation between evaporation zone length and coolant mass flux

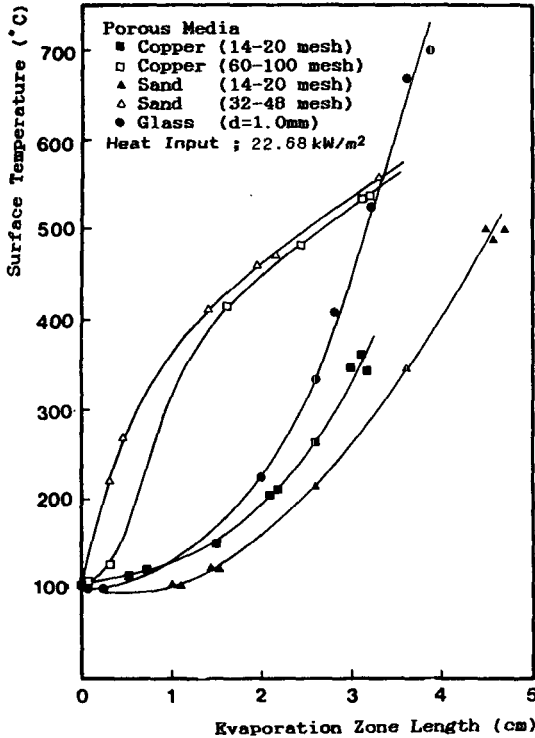


Fig. 9 Relation between surface temperature and evaporation zone length for constant heat input

표면온도를 나타낸 것으로 그림에서 표면온도는 증발영역의 길이가 증가할수록 증가함을 보이고 있다. 이는 증기영역의 증가에 따른 현상으로 다공물질의 입자크기 및 공극율의 증가, 그리고 냉각수 질량유속의 감소등과 일치된 경향을 나타낸다. 따라서 냉각수의 불완전한 증발로 인한 증발영역의 길이 증가는 다공층의 표면온도를 증가시킴으로써 증발분출냉각계의 냉각효율을 감소시키는 요인으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

3.4 냉각수 유동의 안정성

일반적으로 증발분출냉각계는 냉각수의 상변화시 마찰손실이 큰 증기영역의 압력증가로 인하여 냉각수 공급의 감소현상이 나타나며 이는 다공층 표면온도의 급등현상을 유발한다. 따라서 증발분출 냉각계의 안전한 운전조건을 유지하기 위하여는 일정한 냉각수 질량유속의 조건이 만족되어야 한다.

Fig. 10과 11은 일정한 열입력하에서 시간의 경과에 따른 주입압력수두를 냉각수 질량유속의 변화

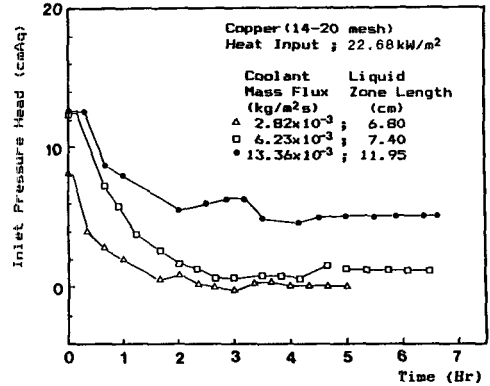


Fig. 10 Inlet pressure head variation with time

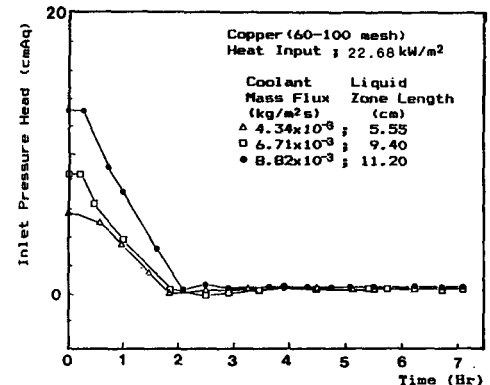


Fig. 11 Inlet pressure head variation with time

에 대하여 나타낸 것이다. 이들 그림에서 실험초기의 주입압력수두는 표면온도가 포화온도에 도달할 때까지는 일정한 값을 유지하나 시간이 지나 냉각수의 증발이 일어나기 시작하면 주입압력수두는 현저하게 감소하는 경향을 보인다. 그러나 대략 2~4 시간후 주입압력수두는 거의 일정한 값을 유지하며 액체영역높이에 해당하는 액체의 정압(hydrostatic pressure)보다 낮은 압력하에서도 연속적으로 안정된 냉각수의 공급이 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞에서 언급한 바와 같이 일반적으로 증발분출냉각계에 있어서 나타나는 냉각수 유동의 불안정성 현상과 상반되는 결과이다. 이는 본 실험의 결과로부터 고찰해 볼 때 냉각수의 질량유속이 비교적 작은 범위에서는 증발영역의 발생시 다공물질의 구조적 특성으로 인한 모세관압력의 영향이 증기영역의 마찰손실에 의한 영향보다 상대적으로 크게 나타나기 때문으로 상변화가 시작되는 증발영역의 하단경계면에서 포화도(saturation)의 도약(jump) 현상에 따른 모세관압력의 급격한 증가에

기인한 것으로 판단된다. 따라서 정상상태의 증발분출냉각계는 작은 냉각수 질량유속의 범위에서 모세관압력의 영향으로 말미암아 액체영역의 압력이 증기영역의 압력보다 낮은 조건하에서도 모세관 구동흐름(capillary driven flow)의 발생으로 인하여 냉각수의 연속적 공급이 이루어지며 액체영역높이에 해당하는 액체의 정압보다 낮은 압력하에서도 안정된 운전조건을 유지할 수 있다.

한편 Fig. 10과 Fig. 11의 실험결과를 비교해 보면 다공물질의 입자크기가 큰 경우(14~20mesh) 정상상태의 주입압력수두는 냉각수의 질량유속 변화에 따라 각기 다른 값을 보이고 있으나 입자크기가 작은 경우(60~100mesh)에는 주입압력수두가 대기압하에서 '0'으로서 냉각수의 질량유속에 관계없이 거의 일정한 값을 나타낸다. 이는 다공층내의 모세관압력의 세기가 다공물질의 입자크기에 큰 영향을 받기 때문으로 입자크기가 작은 경우 주입압력수두가 '0'을 나타내는 까닭은 본 실험이 대기압 조건하에서 나타난 현상으로 입자의 크기가 작은 다공물질의 경우 주입압력수두는 모두 '0'로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 증류수를 냉각수로 사용하여 외부열입력 조건하에서 증발분출냉각계에 대한 열전달특성을 실험적으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 증발영역의 발생시 증발영역의 길이는 다공물질 입자의 직경 및 공극율이 클수록 그리고 열유속이 크고 냉각수의 질량유속이 작을수록 증가하며 그 길이의 증가는 증발분출냉각계의 냉각효율을 감소시키는 요인으로 작용한다.

(2) 표면온도는 상변화위치와 밀접한 관계를 지니며 다공물질 입자의 열전도율이 클수록 그리고 입자의 직경 및 공극율이 작을수록 낮아진다.

(3) 정상상태의 증발분출냉각계는 모세관 구동흐름의 발생으로 인하여 작은 냉각수 질량유속의 범

위에서 냉각수의 안정된 흐름조건을 유지할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Schuster, J.R., and Lee, T.G., 1972, "Application of an Improved Transpiration Cooling Concept to Space Shuttle Type Vehicles", *J. Spacecraft*, Vol. 9, No. 11, pp. 804~811.
- (2) Schuster, J.R., and Seay, G.E., 1973, "Simulation of Three Dimensional Coolant Flow within Transpiration Noses", 7th AIAA/ASME/IES Space Simulation Conference, Los Angeles, California.
- (3) Weinbaum, S., and Wheeler, H.L., 1948, "Heat Transfer in Sweat-Cooled Porous Metals", *J. of Applied Physics*, Vol. 20, pp. 113~122.
- (4) Green, L., and Downey, C., 1952, "Gas Cooling of a Porous Heat Source", *J. of Applied Mechanics*, Vol. 74, pp. 173~178.
- (5) Koh, J.C.Y., and Del-Casal, E.P., 1968, "Two-Phase Flows in Porous Matrices for Transpiration Cooling", *Dev. Mech.*, Vol. 4, pp. 1527~1541.
- (6) Rubin, A., and Schweitzer, S., 1972, "Heat Transfer in Porous Media with Phase Change", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 5, pp. 43~60.
- (7) Yang, J.W., 1969, "Analysis of Heat Transfer in Evaporative Cooled System", *J. Spacecraft*, Vol. 6, pp. 759~762.
- (8) Kikkawa, S., and Chisaka, F., 1972, "The Experimental Investigation on Transpiration Cooling", *Bull. of JSME*, Vol. 15, No. 87, pp. 1116~1121.
- (9) Krupiczka, R., 1967, "Analysis of Thermal Conductivity in Granular Materials", *Int. Chem. Eng.*, Vol. 7, No. 1, pp. 122~144.

후 기

본 연구는 1987년도 학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.