

<論 文>

非金屬 環狀워을 갖는 히이트파이프 性能 개선에 관한 연구

徐 廷 一* · 張 靈 錫**

(1986 年 6 月 11 日 接受)

A Study on the Improvement of the Heat Pipe Performance with Non Metallic Circumferential Wick

J. I. Seoh and Y.S. Jang

Key Words; Heat Pipe(히이트파이프), Circumferential Wick(환상워), Slab Wick(슬랩워), Time Step(반복단계), Effective Thermal Conductivity(유효열전도율)

Abstract

The purpose of this research was to study the heat transfer characteristics of heat pipe which used non-metallic(SiO₂), circumferential wick and meshed slab wick as ADI method and experimental results. Compared wick experimental data and results by ADI method showed the good agreement and ADI method was utilized in predicting the performance of heat pipe.

Also, ADI method was applied to predict heat pipe performance according to the various volume ratios of metallic bond. The heat transfer characteristics of heat pipe could be predicted by heat flux and superheat term below the maximum heat flux limit.

According to the addition ratio of metallic bond, heat transfer ratio could be improved as 2-3 times and when heat conductivity ratio(K_b/K_a) was increased at 4-12 ratio, heat transfer was increased as 1.7-2.4 times, and the prediction of heat transfer could be show as exponential type. In producing non-metallic wick used to low heat pipe, metallic bond which is the conductivity of good quality and enduring for high temperature will be improved as an important problem.

기 호 설 명

A : 면적 [m^2]

a : 식 2, 식 3에서 정의 되는 요소 배율계수

b : 식 2, 식 3에서 정의 되는 요소 배율계수

$[B]$: 계수 B 의 온도 매트릭스

$[C]$: 계수 C 의 온도 매트릭스

$[D]$: 계수 D 의 매트릭스

C : 열용량 [$W/s \cdot k$]

C_p : 정압비열 [$J/kg \cdot k$]

H : 잠열 [J/kg]

h : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot k$]

m_0 : 질량흐름율 [kg/s]

Q : 열전달률 [W]

q : 열유속 [W/m^2]

* 正會員, 漢陽大學校 工科學 機械工學科

** 正會員, 漢陽大學校 大學院

R	: 저항 [k/W]
r	: r 방향의 좌표 [m]
T	: 온도 [K]
Δt	: 시간 증분 [sec]
v	: 체적 [m ³]
Z	: Z 방향의 좌표 [m]
ρ	: 밀도 [kg/m ³]
ε	: 벽의 다공성 [-]
L_t	: 히이트 파이프 총길이 [m]
K	: 열전도율 [W/m·k]

하 첨 자

a	: 단열부
c	: 응축부
e	: 가열부
o	: 외 부
i	: 내 부
j	: 매트릭스의 j 열
k	: 매트릭스의 k 컬럼
inf	: 벽과 증기의 경계
N, S, E, W, C	: C 요소를 중심으로 한 이웃요소
n, s, e, w	: C 요소와 이웃요소와의 경계요소
l	: 액 체
s	: 고 체
v	: 증 기
eff	: 유 효

상 첨 자

N	: 새로운 계산 단계
O	: 이미 계산되어진 단계

1. 서 론

히이트파이프(heat pipe)는 蒸發部와 凝縮部 사이에 적은 溫度差로서 多量의 熱傳達을 할 수 있는 밀폐형 시스템으로서 wick의 材質, 作動流體의 종류에 따라 그 성능이 좌우된다. 작동유체의 밀도, 표면장력 등의 물성은 wick조 내의 세공(pore)과 유동저항에 상호 관계를 갖고 있기 때문에 원할한 히이트파이프 성능은 wick조에 관계된다⁽¹⁾. wick의 구조는, 1963년 히이트파이프가 미국의 우주선에 搭載된 이래 많은 기초적 연

구를 배경으로 기술적 개량이 되어서 아태리형, 소결형, 그루우브형, 복합형 등 여러가지 樣의 개선에 대한 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 熱交換器, 태양에너지 흡수기 등의 응용면에 비중을 두는 경향이다⁽²⁾. 그러나 wick개선에 대한 연구는 계속되고 있으며^(3,4) 국내 생산에 요구되는 기초자료로서 더 많은 연구가 필요하다⁽⁵⁾.

wick을 재질에 따라 분류하면 燒結金屬, 스크린, 그루우브릭으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 그루우브릭은 기계 가공에 어려움이 있고, 燒結金屬릭은 스크린릭보다 熱傳達率이 좋으나^(6,7) 소결 과정의 복잡성으로 製作單價가 높다. 이에 반해 非金屬性 재질은 열쇼크에 대한 저항이 크고 견고한 결합성, 높은 제작성, 화학적인 안정성, wick표면의 젖음성⁽⁸⁾ 등의 좋은 조건을 갖고 있다. M.A Merrigen⁽⁹⁾은 파이프 벽을 세라믹으로 제작하여 高溫用(동작온도범위 750~3000K) 히이트파이프의 성능검사를 실험한 것이 있고, J.K Ferrell⁽¹⁰⁾은 유리모넬을 이용하여 열전달 推定式을 세운 논문이 있다. 그러나 저온용 히이트파이프에는 非金屬릭을 사용한 예가 거의 없다.

비금속성 재질을 wick으로 하였을 경우 나타나는 문제점으로 금속릭의 열전도율($Cu: K=398W/m \cdot k$)에 비해서 SiO_2 는 8.2W/mk, Al_2O_3 는 35.3W/mk, Sic 는 82.3W/mk로서 비교적 낮은 열전도율 값을 갖고 있고, 粒子의 크기 때문에 벽두께도 열전달에 영향을 미칠 것이라고 생각된다.

히이트파이프의 wick에서 열전달은 wick의 세공사이를 유동하는 작동 유체가 매우 느리므로^(10,11) 대류와 복사현상을 무시하여 열전도항만을⁽¹²⁾ 고려 할때 wick에 채워진 작동 유체와 wick재질의 二相을 갖은 有效熱傳導率(effective thermal conductivity)로서 열전달 특성을 결정할 수 있다. 二相유효열전도율의 연구로서는 상당한 연구가^(13,14) 있고, 특히 Goring and Churchill⁽¹⁵⁾은 Maxwell의 유효열전도율식을 실험적으로 검토한 결과 매우 잘 일치함을 밝혔다.

한편, 결합재를 포함한 3상계의 유효열전도율을 고려하기 위하여, wick의 열전달 과정을 작동액체가 채워지지 않은 입자만을 고려 할때 입자와 입자 사이의 접촉면적은 열전달에 영향을 준다. Fig. 1은 3相계의 열전달 과정을 나타낸 것이다. 입자와 입자 사이에 高性能 열전도율을 가진 結合材는 열흐름 경로의 접촉면적을 크게하는 반면, 排列(array)이 직렬의 형태이므로 유효 열전도율은 결합재의 첨가비에 따라 히이트파이프 성능 개선에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

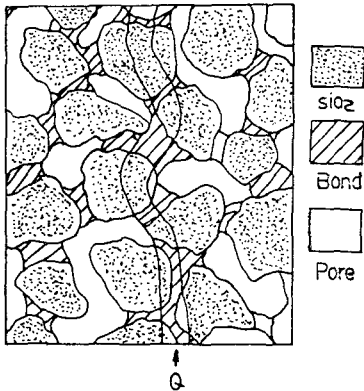


Fig. 1 Cross-section showing the microstructure of a three component(SiO₂, Bond, Pore)

井村定久⁽¹⁷⁾은 研磨砥石에 結合제를 증가시키면서 有效 열전도율을 실험적으로 연구한 결과 有效 열전도율은 結合제의 열전도율이 가장 큰 영향을 끼친다고 했고, 高沢⁽¹⁸⁾은 Eucken 식을 사용해서 직열(series), 병열(parallel)의 배열을 조합한 有效 열전도율 식을 만들었다.

非金屬性 재질을 低溫 히이트파이프 wick으로 사용하기 위한 방법으로 작동유체가 원주에 환류할 수 있는 環(circumferential wick)을 非金屬性 재질로 하고 액체가 귀환 할 수 있는 環을 슬랩(slab)wick으로 한 1조의 복합wick으로 하면 그루우브wick, 소결금속wick 보다도 제작 공정이 단순하여 작업이 간편 할뿐 아니라 다량 생산할 수 있고, 세공의 조정으로 최대 열전달율도 개선 될 것으로 판단된다.

히이트파이프의 성능 해석은 작동 유체가 環상에서 정지 상태에 있다고 가정해서 環을 포함한 전영역을 열저항 항으로 하여 ADI 해석 해법으로 해석하면 매우 유용하다. ADI(Alternating Direction Method)법은 1955년 Canahan에 의해서 제창되어진 해법으로서 1단계는 r-z 방향으로 반복하는 두개의 미분식을 고려한다. 두미분식을 가우스 소거법으로 전진 대입법에 의해 해석 함으로 非線形的인 문제도 쉽게 해결할 수 있는 해

석법으로 알려져 있다. 안정성은 Neuman Method⁽¹⁹⁾에 의해 반복 조건과 적정 좌표 결정은 매우 넓은 범위로서 해석이 가능하므로 過渡熱傳達 연구에는 더욱 유용하다. ADI법은 Douglas and Gann⁽²⁰⁾에 의해서 熱傳導 문제를 수치 해석한 것은 다수의⁽²¹⁾ 연구가 있다.

본 논문에서는 비금속성 재질(SiO₂)로 만든 環의 열전달 특성을 실험적 해석적 방법으로 연구했다. 먼저 비금속 環을 단독으로만 실험하여 해석해와의 일치성을 밝히고, 環의 성능 개선을 위해 結合재의 첨가가 히이트파이프 蒸發部の 열전달에 미치는 영향을 ADI 해석 해법으로 豫測하였다. 따라서 고온용 히이트파이프 뿐만 아니라, 低溫用에서도 비금속 環의 사용을 위한 가치 판단을 하고 비금속성 재질(SiO₂ 등)이 環으로서 넓게 이용 될수 있다는 가능성을 提示하는데 그 목적이 있다.

2. 基礎理論과 수치해석

Fig. 2은 히이트파이프의 성능을 해석하기 위한 모델로서 히이트파이프 벽과 환상위를 나타 낸 것이다. Z방향의 선단에서 Z_e까지는 蒸發部 영역이고, Z_e에서 Z_a까지는 斷熱部 영역이고, Z_a에서 Z_c는 凝縮部 영역을 나타낸 것이다. o점은 측정코자 하는 지점의 열전대접촉 점을 표시한 것이다. 해석 모델을 r-z 방향의 2차원을 고려하여 다음과 같은 가정을 둔다.

(1) 증기 영역에 접한 要素는 경계에서 熱抵抗은 무시하고 요소는 連續되어 있고 溫度는 時間과 공간좌표의 함수이다.

(2) 作動流體의 증발은 環의 表面에서 일어나고 氣-液의 界面은 증기가 環내부에 침투하지 않고 表面에 고정되어 있다.

(3) 環狀위를 구성하는 입자는 일정하며 작동유체는 세공에 채워져서 정지 상태로 있으며 열전도는 有效 열전도율에 따른다.

2.1 基礎式

히이트파이프의 열전달 해석을 위해 Fig. 3와 같이

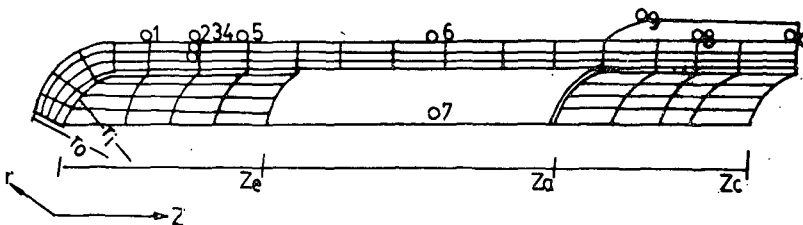


Fig. 2 Analytical model of heat pipe area

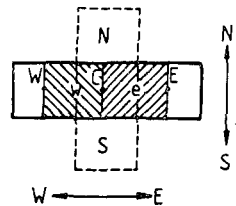


Fig. 3 Division of nodes

中心要素에 대해서 에너지 식을 쓰면

$$\rho CV \frac{\partial T}{\partial t} = Q_N + Q_S + Q_W + Q_E \quad (1)$$

要素 C의 隣接要素와 境界面을 *n.s.e.w*로 두고 要素 C의 隣接要素에 대한 열저항을 *N-S* 방향으로 고려하면

$$R_N = \frac{\Delta r \cdot b}{2\pi r_i \Delta z \cdot a K_N} \quad R_C = \frac{\Delta r \cdot b}{2\pi r_i \Delta z a k_c}$$

$$R_S = \frac{\Delta r \cdot b}{2\pi r_i \Delta z a k_s} \quad (2)$$

W-E 방향에 대해서는

$$R_W = \frac{\Delta Z \cdot a}{2\pi r_i \Delta r \cdot b k_w} \quad R_C = \frac{\Delta Z \cdot a}{2\pi r_i \Delta r b k_c}$$

$$R_E = \frac{\Delta Z \cdot a}{2\pi r_i \Delta z a k_e} \quad (3)$$

여기서 *a*와 *b*는 요소의 배율계수로서 凝縮部와 蒸發部 및 壁부분에서 요소의 크기를 결정할 수 있고 단열부에서는 *a·b*의 값은 1이 된다. 각 要素와 要素 사이의 경계는 인접요소와 직렬배열이므로 평균 열저항을 *N-C* 요소에서만 고려하여 첨자를 *n*으로 표시하면 다음식으로 나타낸다.

$$R_n = \frac{1}{2} (R_N + R_C) \quad (4)$$

각각 다른 인접요소에 대해서도 같은 방법으로 *R_s*, *R_w*, *R_e*를 구할 수 있다. 따라서 식(4)는 식(1)에 대입하여 나열하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{R_n} (T_n - T_c) + \frac{1}{R_s} (T_s - T_c) + \frac{1}{R_w} (T_w - T_c) + \frac{1}{R_e} (T_e - T_c) = \rho CV \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

식(5)는 해석 전영역의 기초식으로 먼저 *N-S* 방향으로 1/2 단계로 풀면

$$\frac{1}{R_n} (T_n^{\frac{1}{2}N} - T_c^{\frac{1}{2}N}) + \frac{1}{R_s} (T_c^{\frac{1}{2}N} - R_c^{\frac{1}{2}N}) + \frac{1}{R_w} (T_w^0 - T_c^0) + \frac{1}{R_e} (T_e^0 - T_c^0) = \frac{\rho CV}{\Delta t/2} (T_c^{\frac{1}{2}N} - T_c^0) \quad (6)$$

계수를 정리하여 비교하면

$$[C]_{k,j-1} = [C]_{k-1,j} \quad (7)$$

으로 들 수 있으므로 *N-S* 방향의 처음 1/2 단계의 식으로 임의의 요소에 대해서 쓰면

$$-[C]_{j-1} T_N^{\frac{1}{2}N} + [B]_j T_C^{\frac{1}{2}N} - [C]_j T_S^{\frac{1}{2}N} = [D] \quad (8)$$

여기서

$$[C] = \frac{1}{R_s}$$

$$[B] = \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_s} + \frac{2\rho CV}{\Delta t}$$

$$[D] = \frac{1}{R_w} T_w^0 + \left(-\frac{1}{R_w} - \frac{1}{R_e} + 2\rho C \frac{V}{\Delta t} \right) T_c^0 + \frac{1}{R_e} T_e^0 \quad (9)$$

W-E 방향에 대해서 정리하면 식(8)과 유사한 식으로 풀 수 있고 식(10)의 형태로 된다.

$$-[C]_{j-1} T_N^N + [B] T_C^N - [C]_j T_E^N = [\bar{D}] \quad (10)$$

식(9)에서 $[B][C]$ 의 계수를 구하여 가우스 소거법에 의해서 식(8)을 풀고 다시 식(10)의 식은 식(8)을 구한 各要素의 溫度를 기지 값으로 $[\bar{D}]$ 에 대입하여 1단계를 마친후, 다시 식(10)의 값을 식(8)에 기지 값으로 하여 반복해서 풀어 1단계를 1/2 단계씩 나누어 진행하는 동안 과도적인 溫度分布를 구할 수 있다.

2.2 蒸氣領域의 식

증기 영역에서는 경계에서 熱抵抗을 무시 한다는 가정으로 부터 다음과 같이 둔다.

$$\frac{AK_i}{\rho CV} \gg 1 \quad (11)$$

따라서 식(1)의 온도는 *Z*방향만 고려할 수 있으므로

$$T = T(z,t) \quad (12)$$

증기와 접하고 있는 壁과의 경계에서는 *m₀*의 질량 유량이 유입 및 유출되므로 *z*방향에 따라 加熱部 영역에서는

$$\dot{m}_E = \int_0^{z_e} \dot{m}_e \cdot dz \quad (13)$$

로서 壁면에 따라 일정한 방출이 된다면

$$\frac{\dot{m}_E}{z_e} \approx \dot{m}_e(z) \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다.

히이트파이프 가열부 및 응축부의 전영역에서 흡출이 일정한 경우 *m₀(z)*은 다음처럼 히이트파이프 전구간에 대해서 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_0(z) = \frac{Q(z)}{H} = \begin{cases} \frac{Z}{Z_c} \frac{Q_c}{H} & 0 \leq Z \leq Z_c \\ \frac{Q_c}{H} & Z_c \leq Z \leq Z_a \\ \frac{Z_c - Z}{Z_c - Z_a} \frac{Q_c}{H} & Z_a \leq Z \leq Z_c \end{cases} \quad (15)$$

질량 유량이 凝縮部와 蒸發部の 경계에서 출입으로 인하여 증발부에 미치는 영향을 고려하기 위해서 시간과 공간좌표에 의한 해석식으로 질량보존의 식과 에너지 보존의 식으로부터 유도한 결과식은

$$-\frac{\dot{m}_0 C_p}{A} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial T_v}{\partial z} \right) = (\rho C)_{eff} \frac{\partial T_v}{\partial t} \quad (16)$$

로 나타낸다. 식(16)은 David⁽²²⁾가 다공성 재질내에서 상변화를 하는 유체의 기초식과 유사한 식이다.

식(16)을 유한 차분식을 사용하기 위해 고려하고 있는 영역의 요소를 Z 방향으로 나누어서 요소 C를 중심으로 蒸氣部의 요소를 분할하여 요소의 경계를 e, w로 두고 에너지 평형식을 세우면 식(6)에서 Z방향만을 고려 할 수 있다. 식(16)에서 왼쪽 첫항을

$$\dot{q}(t, z) = \frac{-\dot{m}_0 c_p}{A} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (17)$$

으로 두고 中心差分形으로 나타내면 다음식으로 표현된다.

$$Q_v = \dot{m}_0 c_p (T_e^\circ - T_w^\circ) \quad (18)$$

식(18)은 蒸氣領域에서 항상 1단계씩 지연되어 熱源의 항으로 되고 식(16)은 진행단계를 Z(W-E direction) 방향만 고려하여 계산된다. 따라서 위과 단열부측의 마지막 1/2 단계가 끝나면 증기부와 인접한 요소의 값을 기저 값으로 하여 증기 영역의 온도를 구한 후 전 증기 영역의 온도를 평균으로 하여 증기의 온도로 하였다.

2.3 境界條件

환상위를 포함한 히이트파이프벽 주변의 境界와 접하고 있는 要素에 대해서는 다음과 같은 境界조건을 고려한다.

$$(1) r=r_0, \quad 0 < z < z_c \quad (19)$$

$$\frac{1}{R_n} (T_N - T_C) = Q_v$$

$$(2) r=r_0, \quad z_c < z < z_a \quad (20)$$

$$\frac{1}{R_n} (T_N - T_C) = 0$$

$$(3) z=0, \quad z=z_c \quad (21)$$

$$\frac{1}{R_w} (T_w - T_C) = 0, \quad \frac{1}{R_e} (T_E - T_C) = 0$$

$$(4) r=r_0, \quad z_a < z < z_c \quad (22)$$

$$\frac{1}{R_{SUR}} (T_{SUR} - T_C) = Q_N$$

$$(5) \text{위터자켓과 응축부벽과 접하고 있는 히이트파이프 벽면의 에너지 평형은}$$

$$\frac{1}{R_{SUR}} (T_C - T_{SUR}) = \frac{1}{R_i} (T_{SUR} - T_i) \quad (23)$$

로 표시된다. 단, 여기서 R_e 와 R_{SUR} 은 병각수의 벽면의 抵抗을 표시한다.

$$R_i = \frac{1}{2\pi\gamma_0 a \Delta z \cdot h} \quad (24)$$

$$R_{SUR} = \frac{\Delta r \cdot b}{2\pi\gamma_0 a \Delta z k_n}$$

식(19)~(24)는 식(5)에 대입하면 수정된 선형 연립방정식 식(8), 식(10)으로 된다.

2.4 수치해석 방법

Fig. 4은 본 연구에 사용한 프로그램의 유통도로서 1개의 주프로그램과 5개의 부프로그램과 2개의 함수 프로그램으로 구성되어 있고 부프로그램은 식(2), 식(3), 식(4)의 熱抵抗 및 계수를 계산하기 위해 만들어졌다. 함수프로그램은 시간에 따른 온도 변화의 물성치 계산을 위해 프로그래밍 되어 있다. 계산값은 지정된 단계마다 出力되도록 했다. 부프로그램으로서 유효 열전도율식은 Maxwell 식을 사용하였고 3상계에서는 高沢의 식으로서 프로그래밍 하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험용 히이트파이프의 제작

Table 1은 본 연구에 사용한 히이트파이프의 제원을 나타낸 것이다. 위은 모재를 SiO₂로 하고, 결합재는 경주도석 20%, 활석 10%, 안양 70% 비율로 잘 섞은 뒤 모재와 결합재의 질량비가 82 : 18이 되도록 혼합하여 40mesh의 체로서 뒤섞고 증발부와 응축부에 가압 성형하여 12시간동안 자연건조후 가열기에 넣어서

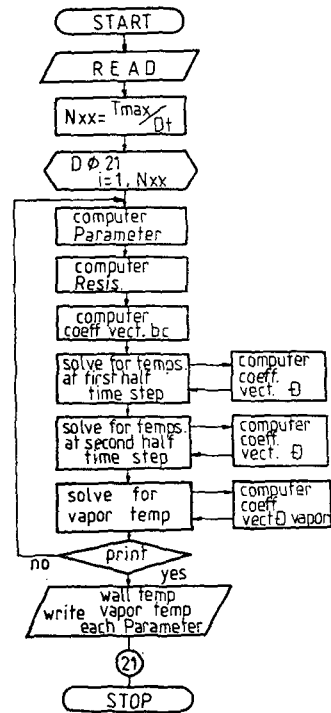


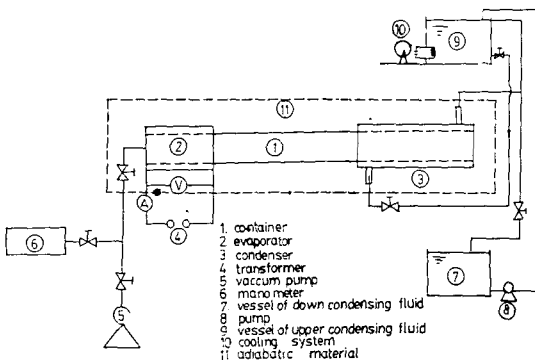
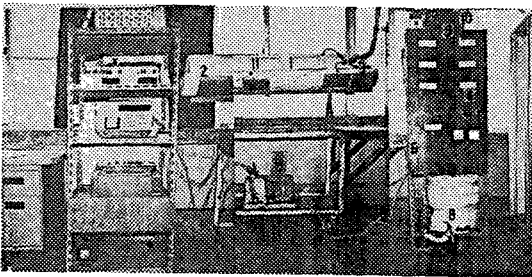
Fig. 4 Flow chart

Table 1 Dimension and material of heat pipe

Total length	800mm
Length of evaporator	120mm
Length of condenser	170mm
Outside diameter of pipe	25.4mm
Inside diameter of pipe	21.4mm
Wall thickness	2mm
Working fluid	Water
Material of pipe	SUS 304
Slab wick	4 layers 120 meshes Around slayers 80 meshes screen
Circumferential wick	Siliconoxid

1150°C 까지 가열하여 4 시간 항온후 노냉시켰다. 슬랩윅은 80mesh를 5점 위에 120mesh를 4점으로 한 후 5cm 간격으로 직경 약 5mm가 되도록 스폿 용접을 하였다.

히이트파이프의 작동流體는 증류수를 사용했으며 진공펌프(Rotary 형 5×10^{-3} torr)로 5분간 작동하여 마노미터 눈금이 3 시간 동안 변화가 없을때 진공 쪽을 잠그고 30cc의 주사기로 작동流體를 주입한 후 진공 밸브를 닫았다. 凝縮器는 내경 30mm, 두께 2mm인 SUS 304 로서 컨테이너 외벽에 고정된 후 사용하여

**Fig. 5** Schematic of the experimental setting up

일체로 만들었다.

3.2 실험장치 및 방법

Fig. 5는 실험장치를 나타낸 것이다. 제작된 히이트파이프의 증발부에 Ni-Cr(0.5mm×2m)을 감고 입력량의 변화는 변압기로 하였다. 냉각수는 일정수위가 유지되도록 물펌프로써 아랫 수조의 냉각수를 윗 수조에 계속 공급하여 오우버 플로우 되도록 했다. 유량은 500cc 메스시린더로서 유량을 측정할 결과 측정시간 동안 200cc/min을 유지할 수 있었다.

히이트파이프의 각부분의 溫度는 c-c 熱電對를 Fig. 2 처럼 가열부에 5본, 단열부에 1본, 응축부 벽면 1증기부 1본, 냉각수 입구 출구에 각각 1본씩 하여 10본의 온도를 동시 측정하였다. 측정기는 디지털 측정기(UCAM-5A 10 channel)를 이용하였다. c-c 열전대 온도 보정은 풍속계(anemometer)로 했으며 1mV=23.657°C로 환산할 수 있었다. 히이트파이프의 단열은 퍼얼라이트[제작회사: 삼손(주), 물성: SiO₂ 75%, Al₂O₃ 13%, K=0.025~0.045Kcal/mK]를 직경 25cm×길이 1.5m로 하고 가열부는 1cm의 두께로서 압면을 싸고 그 위에 펄라이트를 덮었다. 測定은 먼저 냉각수를 흘러 수량을 진공 쪽으로서 200cc/min이 되도록 조절하였다. 다음 입력을 20W부터 가열하여 定常點에 도달할 때까지 히이트파이프 전체영역의 溫度變化의 과정을 점점하였다. 이와같은 실험을 가열부에 드라이 아웃이 일어날때까지 계속해서 전압을 20~200W로 증압 시켜가면서 반복했다.

4. 結果 및 考察

4.1 實驗値와 解析解의 비교검토

Fig. 6은 위의 제질을 SiO₂로 하고 입력을 136W로 한 경우 히이트파이프의 전체 영역을 실험결과와 해석결과를 비교한 것이다. 히이트파이프의 정상상태는 증기의 온도가 시간이 지남에 따라 거의 변화하지 않은 위치로서 나타내며 실험시작 후 약 20분에서 나타났다.

증기의 온도는 實測値와 解析値는 정상이 될 때까지 약 1.2°C의 차이가 있었으나 시간이 경과함에 따라서 실측치 온도는 약간씩 상승하는 경향으로 나타났고 정상후 실측치 변화는 2°C 이내였다.

순환 냉각수의 출구 온도는 열전대의 정착상태가 영향을 미쳐 실측치는 해석해에 비해 비교적 큰 값으로 나타났다.

가열부의 온도는 히이트파이프의 水平狀態에서 上側

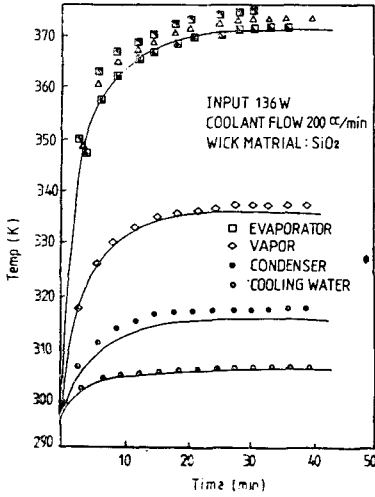


Fig. 6 Comparison of theoretical and experimental results

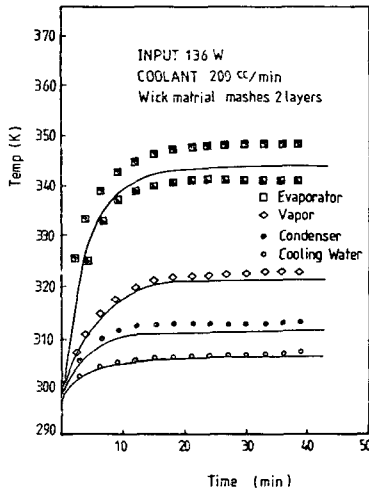


Fig. 7 Comparison of theoretical and experimental results

과 中間側으로 나누어서 측정한 결과 上側의 값은 비교적 높은 결과를 보였고 Fig. 6에서 나타난 Δ 표는 양측의 평균값으로 해석해에 비해 약 3°C의 높은 값으로 나타났다.

Fig. 7은 SiO_2 의 워와 비교하기 위해서 金網을 2점으로 하고 입력을 136W의 동일 조건하에서 실험한 결과를 나타낸 것이다. 가열부의 온도와 증기의 온도는 SiO_2 에 비해 낮은 값으로 나타났고 냉각수 출구의

온도는 거의 같은 값을 보였다. 대체적으로 SiO_2 워의 경우 외벽의 온도 분포 및 냉각수의 온도는 같은 경향을 보였다.

Fig. 8은 SiO_2 와 金網워이 동일 조건하에서 히이트파이프의 각 영역에 나타난 溫度의 비교도를 나타낸 것이다. SiO_2 를 사용한 경우 蒸氣溫度는 전체 금망에 비해 큰 값으로 나타났으며, 금망의 경우는 겸수가 적을수록 낮았다. 동일 입력 값에 대한 증기의 반응은 단지 작동액으로 채워진 워의 구성으로 워 두께가 두꺼울수록, 열전도율이 적을수록 증기의 반응은 높은 값을 보였다.

히이트파이프의 전 영역에서 환상워를 SiO_2 로 했을 경우와 金網으로 한 경우를 해석해와 비교 검토 결과 전 영역에 걸쳐 실측치가 해석치보다 대체적으로 높은 값으로 나타났으나 거의 같은 경향으로서, 만족한 범위내에 있었다.

Fig. 9는 히이트파이프 벽면의 열저항이 증기의 반

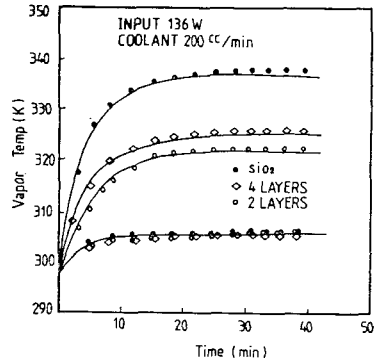


Fig. 8 Comparison of response vapor temp. between SiO_2 and meshes wick

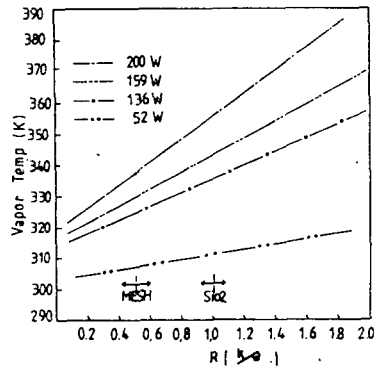


Fig. 9 Comparison of response vapor temp. according to resistance variation

응에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 金網인 경우는 金網과 금망사이의 갭(gap)의 영향을 고려해서 2겹인 경우는 열저항 값이 0.53k/W 이고 3겹이면 0.7k/W 였으나 SiO₂를 사용한 경우는 1.09k/W 로서 SiO₂ 경우가 金網보다 항상 높은 값으로 나타났다. 열저항 값에 대한 증기의 반응은 열저항 값에 대한 증기의 반응은 열저항 값이 클수록 증기의 온도는 증가하였고, 입력이 클수록 열저항에 대한 증기부의 온도는 매우 급상승하였다. 200W 인 경우 SiO₂와 금망 사이는 증기의 온도가 약 17°C의 차이를 보였다. 결국 SiO₂의 열저항 범위는 금망보다 항상 높은 값을 갖고 열저항에

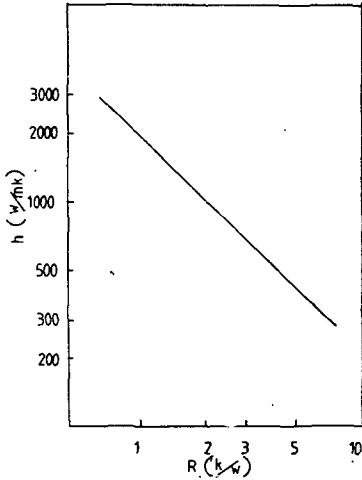


Fig. 10 Relation between resistance and ratio ($q/\Delta T$)

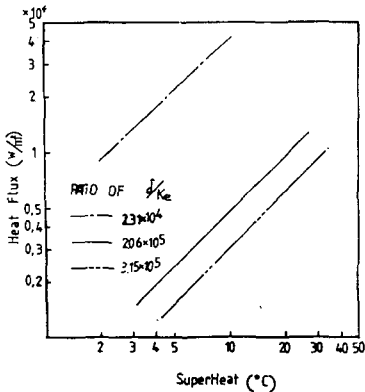


Fig. 11 Comparison of heat transfer according to wall thickness

따라 히이트파이프 열전달율은 결정된다고 할 수 있다.

Fig. 10은 열저항과 $q/\Delta T$ 의 관계를 표시한 것이다. 열저항과 $q/\Delta T$ 의 관계를 로그-로그 좌표에서 그려서 식으로 표시하면

$$q/\Delta T = 2000R^{-0.066322} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

의 관계를 갖고 있으며 (熱傳達은 로그-로그 좌표에서 열저항이 클수록 직선적으로 감소 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 입력이 159W인 경우 워두께의 변화가 열전달율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. SiO₂ 워의 두께를 0.002m, 0.00264m, 0.004m로 변화 했을때 워두께와 열전달 관계는 0.002m인 경우는 δ/k_e 가 $2.3 \times 10^{-4} \text{ [W/m}^2\text{K]}^{-1}$, 0.00264m인 경우는 $2.06 \times 10^{-3} \text{ [W/m}^2\text{K]}^{-1}$, 0.004m 경우는 $3.15 \times 10^{-3} \text{ [W/m}^2\text{K]}^{-1}$ 로서 SiO₂ 워의 경우와 비교하면 2겹의 금망 경우는 0.00264m는 1.9배, 0.004m는 2.95배로 나타났고 3겹인 경우는 1.4배, 2.15배로 각각 나타났다. SiO₂로서 환상워를 제작할 때 두께 문제는 열저항과 관계 있고 열저항이 크면 열전달율이 저하하는 경향으로 SiO₂ 입자의 粒徑은 60mesh 경우 0.35~0.7mm를 고려할 때 워의 두께는 粒徑에 따라 고려되어야 한다.

Fig. 12는 입력을 20~200W까지 순차적으로 가열 할때 蒸發部의 열전달 특성을 나타내기 위해서 熱流束과 과열도 향으로 나타낸 것이다. 본 연구에서 실행한 열유속이 0.3~2W/m²의 범위에서는 과열도와 熱流束은 로그-로그 좌표에서 비례적으로 나타났으며, 이 범위를 벗어 날 때는 열유속에 대한 과열도는 증가하

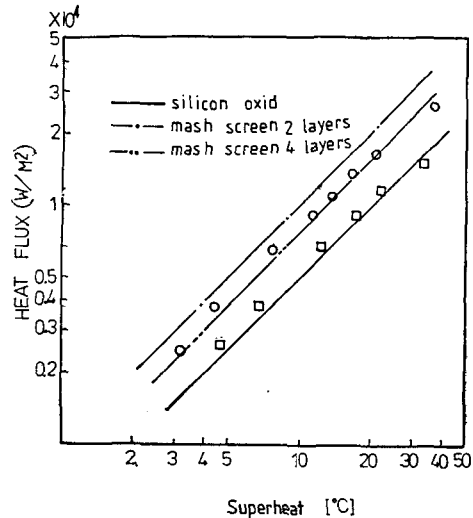


Fig. 12 Comparison of heat transfer for SiO₂ and meshes wick

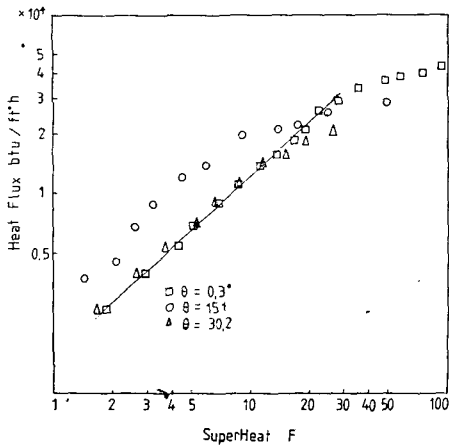


Fig. 13 Comparison of result with data of ferrell and predicted heat transfer

는 것으로 나타났다. 과열도가 증가하는 것은 처음 히이트파이프를 작동하여 정상 상태가 된 이후 점점 입력을 증가시키면 슬랩익은 순환 작동유체를 순조롭게 공급하여 열유속과 과열도는 직선적으로 변화한다. 그러나 슬랩익 내에 작동 유체의 수송 능력에 한계점 이상에서는 입력을 증가시키면 기-액의 경계가 증기의 침투로서 후퇴하게 되므로 가열부는 선단부터 부분적으로 과열현상이 일어난다. 따라서 해석하는 기-액의 경계가 익의 표면에 있는 경우만 고려하였다. 이 경우 SiO₂ 익은 金網 4겹에 비해 항상 낮은 값을 가지고 있으며 히이트파이프의 성능 개선을 위해 SiO₂의 유효 열전도율을 고려한 방법을 모색할 가치를 가진다.

Fig. 13은 Ferrelle⁽⁹⁾이 대기압하에서 다공성물질을 파이프내에 채운후, 일단을 액체가 담긴 용기에 잠기게 하고 다른 일단을 가열 할때 경사에 따라 가열부의 열전달 상태를 과열도와 열유속항으로 나타낸 것이다. 수평에 대한 경사각이 15.1°일 때 最大熱流束 이하에서는 서로 직선적으로 변화하였으나 이 이상에서는 熱流束에 대한 과열도는 증가하는 현상으로, 본 실험에서 고려한 결과와 같은 경향이다. 따라서 히이트파이프의 성능 예측은 익에 증기가 침투하지 않은 최대 열유속 한계 이하에서는 열유속과 過熱渡항으로서 ADI 해석해로 열전달 특성을 고려할 수 있다고 판단된다.

4.2 非金屬 환상위에 結合材 첨가비에 따른 영향

4.1 절에서 언급한 것처럼 非金屬익은 金網익보다

熱抵抗이 크고 익의 두께는 粒徑에 의해서 제한될 뿐 아니라 전반적으로 금망에 비해 열전달율이 낮다. 따라서 비금속 환상위를 히이트파이프에 사용하기 위해 열전도율이 높은 결합재를 첨가함에 따라 익의 유효 열전도율을 개선하는데 그 목적이 있으므로 비금속성 재질에 대한 결합재의 열전도율(K_b/K_a)비율 2.56~12 배까지 변화를 하면서 결합재의 첨가비율(V_b/V_a)을 5~25%로 첨가할때 히이트 파이프의 성능을 해석해로 추정하였다.

Fig. 14는 결합재의 첨가에 따른 증기부의 온도변화의 추정이다. 입력이 200W에서는 증기의 온도구배가 급강하로 나타났으나 입력이 낮을수록 적었다. 이것은 부하가 적으면 과열도가 적어지는 반면 凝縮部의 순환냉각제의 온도 영향을 받으므로 증기 온도의 강하율은 감소한다고 사료된다. 52W 경우 증기온도와 응축부 온도는 약 10°C 차이가 있었다.

Fig. 15는 結合材의 熱傳導率을 翼재질의 2.56~12

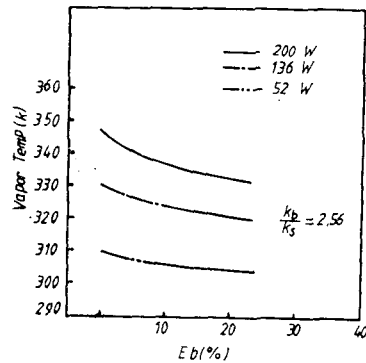


Fig. 14 Predicted vapor temp. for E_b (%) and ratio(K_b/K_a)

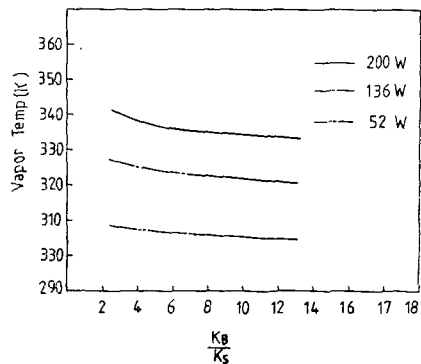


Fig. 15 Predicted vapor temp. for ratio(K_b/K_a) and input

배까지 증가시키면서 입력에 대한 변화를 나타낸 것이다. 200W 경우의 변화는 52W 경우보다 증기의 온도 강하가 컸다.

Fig. 16은 200W 경우 결합재를 10%~23% 증가시키면서 過熱渡와 열유속 관계를 나타낸 것이다. 결합재 첨가 비율($E_b = V_b/V_a$)이 증가할 수록 $q/\Delta T$ 의 값은 증가하는 것으로 나타났고 결합재를 사용하지 않은 경우에 비해서 10% 경우 1.928배 15%는 2.58배, 2.23%는 3.2배의 熱傳達率의 효과를 보였다. 열전달을 h ($q/\Delta T$)와 결합재의 첨가비와의 관계를 식으로 표시하면

$$h = 0.4E_b^{0.599} \times 10^4 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (25)$$

로 되고 결합재의 첨가비에 따른 영향을 제한된 조건 하에서 식(25)로서 검토할 수 있었다.

Fig. 17은 200W 경우 K_b/K_a 의 變化比로서 E_b 를 0.05% 경우에 과열도와 열유속 관계를 표시했다. 結合材의 열전도율비(K_b/K_a)는 증가할수록 열전달율은 증가하였고 (K_b/K_a)가 4경우는 1.7배, 8경우는 2.06배, 12경우는 2.4배로 증가하였다. 이 경우도 역시 식으로 표시하면

$$h = 0.059(K_b/K_a)^{0.30128} \times 10^4 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (26)$$

식(25)와 식(26)과 같이 結合材 및 K_b/K_a 의 비는 식(26)으로 증가함을 보였다. 시판되는 결합재는 대부분 실리콘, 레진, 고무 등으로 열전도율이 0.5W/mK 이하이다. 高熱傳導率인 동시에 耐高溫性 結合材의 개발이 低溫用 히트파이프 제작 및 성능개선에 도움을 줄 것이라 사료된다.

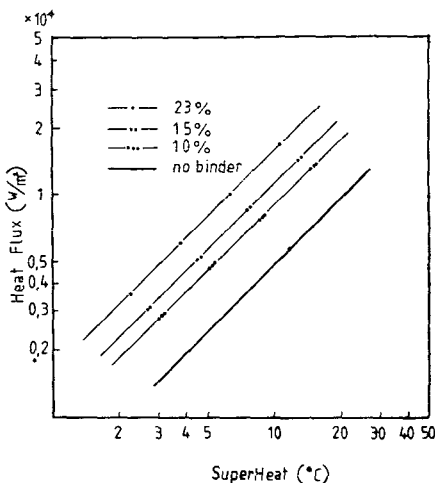


Fig. 16 Predicted heat transfer for E_b (%)

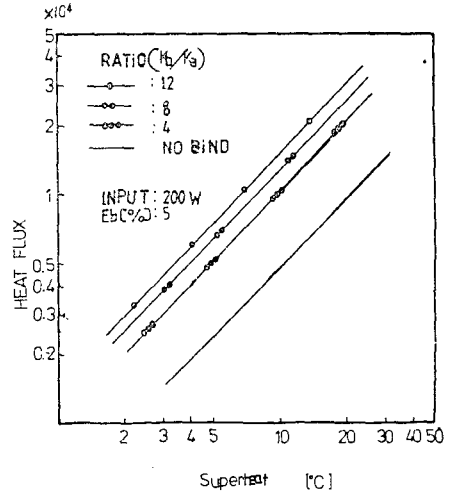


Fig. 17 Predicted heat transfer for ratio(K_b/K_a)

5. 결 론

비금속성 재질인 SiO_2 를 환상릭으로 하고 액체 歸還릭을 금망 슬랩형 익으로 한 히트파이프의 성능을 검토하고, 익의 열전달을 개선하기 위하여 결합재를 일정한 비율로 첨가하는 경우를 ADI 해석 해법으로 추정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 해석하는 실험 결과와 잘 일치하였으며, 히트파이프 성능을 예측하는데 매우 유용하였다.

(2) 히트파이프의 열전달 특성은 최대 열유속 한계 이하에서 열유속항과 과열도항에 의해서 예측할 수 있었다.

(3) 결합재의 첨가비에 따라 열전달율은 2~3배 개선시킬 수 있고 熱傳導率比(K_b/K_a)를 4~12 비로서 증가시키면 열전달율은 1.7~2.4배까지 증가하였다. 또 열전달의 예측을 指數項으로 표시할 수 있었다.

(4) 저온용 히트파이프에 비금속성 익을 사용하기 위해서는 고열전도율 및 내고온성 결합재 개발의 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

- (1) Corman, J.C, Trefethen, L., Walmet, G.E, Characterization of Parameters for Liquid Flow in Rigid Porous Media, Technical Information Series(72CRD115), pp.1~22, 1972

- (2) 小林康徳, 新型ヒートパイプエンジン, 新技術, Vol. 30, No. 11, pp. 23~27, 1984
- (3) Peterson, G.D., Capillary Priming Characteristics of a High Capacity Dual Passage Heat Pipe, Pap. Am. Soc. Mec. Eng., 82-HF-14, pp.23~27, 1982
- (4) Ismail K.A, R., Liu C.Y., Heat Pipe with Modified Internal Geometry, Altern Energy Sources 5part A., pp.455~461, 1983
- (5) 金泰顯, 金琪鉉, 접힌 板材로 만든 그루우브를 갖는 熱파이프에 관한 연구, 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第1號, pp.47~55, 1985
- (6) 柴山信三, 師岡嶺一, ヒートパイプに関する研究(第2報), 日本機械學會論文集(B), 第45卷, 第389號, pp.110~117, 1979
- (7) 野津征一郎, 釜谷富春, ヒートパイプに関する研究, 日本機械學會論文集(第2部), 第35卷, 第270號, pp.392~401, 1969
- (8) M.A. Merrigan and E.S. Keddy, High-Temperature Heat Pipe for Wast-Heat Recovery, AIAA 80~150R, Vol. 6, pp.298~303, 1980
- (9) J.K. Ferrell, H.R. Johnson, The Mechanism of Heat Transfer in the Evaporator Zon of a Heat Pipe., Chemical Engineering Progress Symposium Series, Vol. 66, p.9, 1970
- (10) Jackson, K.W., Enhancement of Thermal Energy Transport Through Granular Media, ph.D Thesis, Georgia Institute, of Tech., 1980
- (11) C.L. Williams and G.T. Colwell, Heat Pipe Model Accounting for Variable Evaporator and Condenser Lengths, AIAA J., Vol. 12, No. 9, pp.1261~1267, 1974
- (12) K.H. Sun and C.L. Tien, Thermal Performance Characteristics of Heat Pipe, in J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp.363~380, 1975
- (13) A.G. Prakouras, R.A. Vachon, R. A. Crane, Thermal Conductivity of Heterogeneous Mixtures, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 1157~1166, 1978
- (14) YU.A. Buyevich, On the Thermal Conductivity of Granular Materials, Moscow, 125040, U.S. S.R., pp.37~48, 1973
- (15) Gorring, Churchill, Thermal Conductivity of Heterogeneous Materials is a useful Concept, Chemical Engineering Progress, Vol. 57, No. 7, pp.54~59, 1961
- (16) S.W. Chi., Heat Pipe Theory and Practice, Mc Graw-Hill, pp.47~48, 1976
- (17) 井村定久, 竹越榮俊, 砥石のような焼結多孔質物體の有効熱傳導率に関する實驗的研究, 日本機械學會論文集, 第44卷, 第377號, pp.144~151, 1978
- (18) 高沢孝哉, 研削熱の加工物入の流入割合, 日本精密機械, Vol. 30, No. 12, p.914, 1964
- (19) Carnahan B. Luther, Applied Numerical Methods, John Wily & Sonc Inc., New York Lon Don, pp.449~451, 1969
- (20) J. Douglass and J.E. Gunn, A General Formulation of Alternating Direction Methods, Num. Math., Vol. 6, pp.428~453, 1964
- (21) Kevin J. Wells, Two-Dimensional Numerical Simulation of Casting Solidification with Heat Pipe Controlled Boundary Conditions, Thesis, Georgia Instsitude of Tech., 1982
- (22) David Moalem, Shiman Cohen, Steady State Heat Transfer within Porous Medium with Temperature Dependent Heat Generation, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 19, pp.1415~1423, 1976