중대사고시 노심용융물의 Rayleigh-Benard 자연대류 예비 실험

문제영 · 정범진[†]

제주대학교 에너지공학과

(2012년 5월 17일 접수, 2012년 9월 10일 수정, 2012년 9월 10일 채택)

A Preliminary Experiment for Rayleigh-Benard Natural Convection for Severe Accident Condition

Je-Young Moon · Bum-Jin Chung[†]

Department of Nuclear and Energy Engineering, Institute for Nuclear Science and
Technology, Jeju National University

(Received 17 May 2012, Revised 5 September 2012, Accepted 5 September 2012)

요 약

원자력발전소 중대사고시 노심용융물의 Rayleigh-Benard 자연대류 문제에 대한 예비실험으로 두 평판 사이의 거리, 측면벽의 유무 및 평판의 기하구조가 열전달에 미치는 영향에 대해 실험적 연구를 수행하였다. 열전달 실험을 대신하여 상사성의 원리를 이용한 황산-황산구리 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 채택하였다. 실험은 Ra_s 는 $1.06 \times 10^7 \sim 2.91 \times 10^{10}$ 의 범위에서 실험적 조건을 변화시켜가며 열전달을 측정하였다. 실험결과 단일 수평평판에서 측정한 열전달은 McAdams의 수평평판 자연대류 열전달 상관식과 일치하였고 두 평판에서 측정한 열전달은 Dropkin과 Somerscales, Globe와 Dropkin의 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달 상관식과 매우 유사한 경향을 보였다. 두 평판 사이의 거리가 작을 경우 열전달이 높다가 거리가 증가하면 단일 수평평판에서의 자연대류 열전달과 같아졌다. 평판에 설치된 핀(Fin)은 열전달을 향상시켰다. 모든 경우에서 측면벽이 없는 경우의 열전달이 측면 벽이 있는 경우보다 항상 높았다.

주요어 : Rayleigh-Benard, 자연대류, 중대사고, 노심용융물, 상사성, 전기도금계

Abstract - Rayleigh-Benard natural convection experiments were carried out as the preliminary experiment to simulate the natural convection of the core melt at the severe accident conditions. This work focused on the influences of plate separation distance(s), the existence of the side walls and crust geometries of upper and lower plates. Based upon the analogy concept, a cupric acid-copper sulfate electroplating system(H_2SO_4 - $CuSO_4$) was employed as the mass transfer system and measurements were made for Ra_s ranging from 1.06×10^7 to 2.91×10^{10} . The test results measured for a single horizontal plate were in good agreement with the correlation reported by McAdams and those for two horizontal plates showed the similar trend to the existing Rayleigh-Benard heat transfer correlations developed by Dropkin and Somerscales, Globe and Dropkin. The measured heat transfer rate decreased with the increasing separation distance between the two plates and became similar to those for a single horizontal plate. Fin arrays mounted on both upper and lower plates enhanced the heat transfer rates. For all cases, the heat transfer rates measured for open side walls are higher than those for closed ones.

Key words : Rayleigh-Benard, Natural convection, Severe accident, Core melt, Analogy concept, Electroplating system

[†]To whom corresponding should be addressed.

Jeju National University 102 Jejudaehakno, Jeju-si, Jeju Special

Self-Governing Province, Korea 690-756

Tel : 064-754-3644 E-mail : bjchung@jejunu.ac.kr

1. 서 론

후쿠시마 원전 사고 후 중대사고(Severe accident)는 실제로 발생할 수 있는 사고로 인식이 전환됨에 따라 보다 심화된 연구의 필요성이 제기되고 있다. 중대사고시 원자로 용기가 파손되기 전에 노심용융물은 Fig. 1처럼 원자로 하반구에 재배치되어 하부의 산화용융물층(UO₂, ZrO₂)과 상부의 금속용융물층(Fe, Zr)으로 분리된다. 재배치된 용융물은 여전히 붕괴열을 발생하므로 냉각되지 않으면 원자로용기를 손상시킨다.

노심용융물 상부의 금속용융물층에서는 Rayleigh-Benard 자연대류가 발생한다⁽¹⁾. Rayleigh-Benard 자연대류는 아래 벽이 고온이고 윗벽이 저온인 두 평면 사이의 자연대류를 말하며 큰 셀 모양의 유동(Cellular motion)으로 특징지어진다⁽²⁾. 두 평평한 벽 사이에서 발생하는 자연대류는 측면 벽의 유무에 따라 열전달 현상이 달라진다. 측면 벽이 있는 경우 Fig. 2와 같이 하부에서 상승하는 뜨거운 플룸(Plume)과 상부에서 하강하는 차가운 플룸에 의해 셀(Cell) 모양의 유동이 형성된다⁽³⁾. 측면 벽이 없는 경우 측면으로부터 차가운 유체가 아래의 가열 벽을 따라 어느 지점까지 흘러들어왔다가 빠져나가면서 Fig. 3과 같은 C loop 모양의 유동이 형성된다⁽⁴⁾. 이 두 가지 경우 모두 자연대류 열전달은 두 평판 사이의 거리에 따라 달라진다.

재배치된 노심용융물의 산화용융물층과 금속용융물층 사이에는 고체 피막층(Crust)이 존재한다. 이것은 산화용융물층의 상하단 평면을 불규칙하게 만드는 요인이 되며 이러한 이유로 인해 노심용융물의 거동은 아직까지 알려지지 않은 부분이 많다.

기존의 Rayleigh-Benard 자연대류 문제는 두 개의 평판에서 대하여 수치적·실험적 연구가 수행되어왔으며 상하단 평면이 불규칙한 구조에 대해서는 보고된 연구가 드물다. 본 연구는 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달 문제를 Rayleigh (Ra_s)수 $1.06 \times 10^7 \sim 2.91 \times 10^{10}$ 의 범위에서 기하구조 형태를 세 가지 경우로 나누어 실험을 수행하였다. 1) 두 평면이 평평한 경우이고, 2) 아래 평면을 요철구조로 하여 Crust를 모사한 경우, 3) 위 평면과 아래 평면 모두가 요철인 구조이다. 요철 형태를 모사하기 위하여 직육면체 형

태의 판형 핀(Fin)을 이용하였다. 각각의 경우에 대하여 두 평판 사이의 거리(s)와 측면 벽의 유무 및 기하구조에 변화를 주어 열전달계수를 측정하였다. 실험 방법은 유사성의 원리(Analogous concept)를 채택하여 열전달 현상을 물질전달 실험으로 대체하였고 황산-황산구리(H₂SO₄-CuSO₄) 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 채택하였다.

2. 이론적 배경

2-1 중대사고

중대사고는 설계기준사고(DBA: Design Basis Accident)를 초과하여 노심손상을 야기하는 사고를 말한다. 중대사고가 진행되면 산화된 피복재 물질과 핵연료가 용융되어 노심 하부로 재배치되어 용융풀을 형성한다. 노심용융물은 밀도차에 의해 하단의 산화용융물층(UO₂, ZrO₂)과 상부의 금속용융물층(Fe, Zr)으로 분리된다(Fig. 1). 핵연료 용융풀에서 산화용융물층과 금속용융물층 사이에는 표면이 거친 고체 상태의 피막층(Crust)이 형성된다⁽⁵⁾.

산화용융물층에는 붕괴열(Decay heat)을 발생시키는 내부 열원이 있는 반면 금속용융물층에는 내부 열원이 없다. 따라서 금속용융물층은 하부의 산화용융물층으로부터 가열되고 상부로부터 냉각되므로 Rayleigh-Benard 자연대류가 된다⁽⁶⁾.

2-2 단일 수평평판에서 발생하는 자연대류 열전달

단일 수평평판에서 발생하는 자연대류 열전달은 잘 알려져 있는 현상이며 지금까지 많은 수치적·실험적 연구가 수행되어왔다. 식 (1)과 (2)는 McAdams가 제

Fig. 1. Distribution of relocated molten core material.

시한 수평평판 자연대류 열전달 상관식이다⁽⁷⁾. Ra 수의 특성길이는 $L_c(L_c=A/P)$ 이다. 여기서 A 는 평판의 단면적, P 는 평판의 둘레길이이다. 본 연구에서는 McAdams가 제시한 특성길이 및 열전달 상관식을 비교 상관식으로 선택하였다.

$$Nu_{Lc} = 0.54Ra_{Lc}^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_{Lc} \leq 10^7) \quad (1)$$

$$Nu_{Lc} = 0.15Ra_{Lc}^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra_{Lc} \leq 10^{11}) \quad (2)$$

2-3 두 평판 사이에서 발생하는 자연대류 열전달

Fig. 2은 Rayleigh-Benard 자연대류에서 발생하는 유동패턴이다. 측면이 막혀 있는 구조로써 하단에서는 가열된 플룸(Plume)이 상승하고 상단에서는 차가운 플룸이 하강하여 Benard cell을 형성한다⁽³⁾. Rayleigh-Benard 자연대류는 평판의 면적에 따라 현상이 달라지며 특성길이로는 두 평판 사이의 거리(s)를 사용한다⁽⁸⁾. 두 평판 사이 거리가 일정할 때, 평판의 면적이 증가함에 따라 열전달이 상승한다. 이러한 원인은 면적이 증가함에 따라 셀의 수가 증가하여 열적 교환이 잘 이루어지기 때문이다.

유동패턴은 층류영역과 난류영역에서 서로 다르게 형성된다. Andrej Horvat와 Ivo Kljenak⁽⁹⁾에 의하면 층류영역($Ra_s < 10^8$)의 경우 유동은 안정적이고 규칙적인 셀을 형성하고 난류영역($Ra_s > 10^8$)가 되면 유동이 매우 불안정하고 상·하부에 불규칙한 셀을 형성한다고 보고했다.

Fig. 2. Cellular flow pattern of Rayleigh-Benard natural convection⁽³⁾.

Rayleigh-Benard 자연대류 열전달에 대해서는 실험적·수치적으로 여러 학자들에 의하여 연구가 수행되었으며 Table 1에 조사한 상관식을 나타내었다^(10~15).

한편, Fig. 3처럼 측면벽이 없는 경우에는 Rayleigh-Benard 자연대류와 다른 유동패턴이 나타난다. O. Mance 등⁽⁴⁾은 측면 벽이 없는 두 평판 사이에서 발생하는 자연대류에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 그들의 연구에 의하면 측면으로부터 들어온 차가운 유체는 하부의 가열벽면을 따라 일정한 거리를 흘러들어왔다가 상부 평면을 따라 측면으로 다시 빠져나가서 C loop의 유동이 발생한다. 또한 두 평판 사이의 거리(s)가 작으면 가열 벽과 차가운 벽에서 발생하는 유동간의 상호작용에 의해 열교환이 잘 이루어져서 열전달이 단일 수평평판보다 높다. 그러나 평판 사이의 거리가 멀어지면 아래 벽이 윗벽의

Table 1. Rayleigh-Benard natural convection heat transfer correlations.

Authors	Pr	Criteria		Correlations
Chu and Goldstein ⁽¹⁰⁾	6	$2.76 \times 10^5 < Ra_s < 1.05 \times 10^8$		$Nu_s = 0.183Ra_s^{0.278} \quad (3)$
Dropkin and Somerscales ⁽¹¹⁾	0.022	$2 \times 10^5 < Ra_s < 7 \times 10^8$		$Nu_s = 0.069Pr^{0.074}Ra_s^{1/3} \quad (4)$
Goldstein and Tokuda ⁽¹²⁾	6.5	$10^9 < Ra_s < 2 \times 10^{11}$		$Nu_s = 0.0556Ra_s^{1/3} \quad (5)$
Globe and Dropkin ⁽¹³⁾	15	$3 \times 10^7 < Ra_s < 7 \times 10^8$		$Nu_s = 0.0665Pr^{0.083}Ra_s^{0.335} \quad (6)$
Goldstein et al ⁽¹⁴⁾	5.5	Laminar	$Ra_s < 3 \times 10^9$	$Nu_s = 0.0722Ra_s^{0.330} \quad (7)$
		Turbulent	$3 \times 10^9 < Ra_s < 5 \times 10^{12}$	$Nu_s = 0.0659Ra_s^{1/3} \quad (8)$
Heslot et al ⁽¹⁵⁾	0.6	Laminar	$3 \times 10^5 < Ra_s < 4 \times 10^7$	$Nu_s = 1 + 0.096Ra_s^{0.333} \quad (9)$
		Turbulent	$4 \times 10^7 < Ra_s < 10^{11}$	$Nu_s = 1 + 0.02Ra_s^{0.282} \quad (10)$

Fig. 3. Flow pattern for open side wall in two horizontal plates.

존재를 인식하지 못하므로 열전달은 단일 수평평판 자연대류의 열전달과 같아진다.

2-4 Fin에서 발생하는 자연대류 열전달

산화용융물층과 금속용융물층 사이에 형성되는 피막층(Crust)은 표면이 매우 불규칙적으로 형성된다. 이를 모사하기 위해서 핀(Fin)을 사용하였다. 핀에서 발생하는 자연대류 열전달은 핀의 높이, 길이, 두께, 그리고 핀 사이 간격에 영향을 받는다⁽¹⁶⁾. 핀이 존재하는 경우의 자연대류 열전달은 핀이 존재하지 않는 경우의 자연대류 열전달보다 크다. 이러한 열전달의 증가 원인은 두 가지로 설명할 수 있다. 첫째, 핀의 존재로 인한 열전달 면적의 증가이다. 이러한 열전달 면적의 변화는 핀의 길이, 두께, 그리고 핀 사이 간격에 영향을 받는다. 둘째, 셀 개수의 증가이다. 핀은 셀을 나뉘어지게 하고, 전체적으로 셀의 개수를 증가시킨다. 이는 열교환을 증가시키므로 열전달이 상승한다. 이러한 셀수의 증가는 핀 높이에도 영향을 받는다. 핀이 충분히 높을 경우, 셀이 완전히 나뉘어지는 반면, 핀이 낮을 경우에는 셀을 완전히 분리시킬 수 없다. 따라서 핀의 높이가 증가할수록 열전달은 증가한다. 특정 면적에서 핀 사이의 간격이 감소할 경우, 핀의 수가 증가한다. 이러한 핀수의 증가는 열전달 면적을 증가시켜서 열전달을 상승시킨다. 그러나 핀 사이 간격이 매우 좁아질 경우, 핀 사이에서 발생하는 유체의 유입이 원활하게 이루어지지 않아 오히려 열전달이 감소하게 된다^(16~20).

2-5 Fin에서 발생하는 자연대류 열전달

열전달과 물질전달은 유사성(Analogy)이 성립된다. 따라서 열전달 및 물질전달 상관식은 서로 변환

Table 2. Dimensionless group for analogy systems.

Heat transfer		Mass transfer	
Nusselt number	$\frac{h_h s}{k}$	Sherwood number	$\frac{h_m s}{D_m}$
Prandtl number	$\frac{\nu}{\alpha}$	Schmidt number	$\frac{\nu}{D_m}$
Rayleigh number	$\frac{g\beta\Delta Ts^3}{\alpha\nu}$	Rayleigh number	$\frac{gs^3}{D_m\nu} \frac{\Delta\rho}{\rho}$

(Transform)이 가능하다. 이러한 열전달계와 물질전달계의 무차원수 관계는 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서는 황산-황산구리($H_2SO_4-CuSO_4$) 수용액의 전기도금계(Electroplating system)를 물질전달계로 선택하였다. 전기도금계의 한계전류를 이용한 물질전달 현상에 대한 연구는 Levich⁽²¹⁾에 의해 처음으로 시도되었으며 Selman and Tobias⁽²²⁾는 여러 가지 조건에서 개발된 물질전달 상관식을 체계적으로 정립하였다. Chung⁽²³⁾등은 다양한 기하구조에서 자연 및 혼합대류 열전달 현상에 관하여 전기도금계를 이용한 실험방법론을 적용하여 기존에 알려진 열전달 상관식을 예측할 수 있음을 검증한 바 있고 다수의 논문을 게재하였다. 유사성을 이용한 실험기법에 대한 보다 자세한 설명은 Kang과 Chung⁽²⁴⁾의 논문에 제시되어 있다.

3. 실험 장치

Fig. 4는 양극 및 음극 구리판과 아크릴 지지대로 구성된 실험장치를 나타낸다. 음극 구리판은 열전달계에서 가열벽면(Heated wall) 역할을 하므로 하부에 배치하였고 양극 구리판은 차가운 벽면(Cold wall) 역할을 하므로 상부에 배치하였다. Fig. 4의 (a)는 측면벽이 없는 경우이고 (b)는 측면벽이 있는 경우를 보여준다. 같은 크기의 양극과 음극 구리판의 면적에 따른 효과를 실험하기 위하여 $0.5 \times 0.15m^2$, $0.5 \times 0.2m^2$, $0.5 \times 0.25m^2$, $0.1 \times 0.15m^2$, $0.1 \times 0.2m^2$, 그리고 $0.1 \times 0.25m^2$ 로 총 6개를 제작하였다. 이 실험장치를 크기가 $0.3m \times 0.4m \times 0.3m$ 인 아크릴 수지로 제작된 수조에 담가서 실험을 수행하였다. 이 수조는 실험장치를 여유 있게 가둘 수 있도록 충분한 크기로 제작되었다.

Fig. 4. Test section.

Fig. 5. Fin arrays mounted on the horizontal plates.

Fig. 5는 노심용융물의 피막층을 모사하기 위하여 채택한 환의 구조를 나타낸다. 충분한 두께의 음극 구리판에 밀링을 하여 환의 두께(t), 높이(H), 그리고 환 사이의 간격(G)이 서로 다른 여러 가지 환 구조를 제작하였다.

Selman과 Tobias⁽²²⁾가 개발한 물질전달 상관식을 이용하여 본 실험의 물성치를 결정하였다. 황산구리 (CuSO_4) 농도는 0.05M며 황산(H_2SO_4)을 1.5M 용해 시켜 전기영동으로 인한 효과를 억제하였다. 전원공급장치는 VüPOWER사의 DC Power supply-IPS-18B10이며, 전압과 전류측정은 Fluke-45사의 Dual Display Multimeter를 사용하였다.

4. 실험 범위

4-1 Rayleigh-Benard 자연대류

Table 3은 Rayleigh-Benard 자연대류 실험범위이다. 실험은 두 평판은 길이가 0.05m, 0.1m이고 폭은 0.15m, 0.2m, 0.25m로 면적이 다른 총 6개의 판에 대해 두 평판 사이의 거리(s)와 측면 벽의 유무를 변화시키면서 측정을 수행하였다. 두 평판 사이거리는 0.005~0.06m이며 특성길이를 판 사이의 거리로 계

Table 3. Test matrix of Rayleigh-Benard natural convection.

Length (m)	Width (m)	Separation distance (m)	Ra_s	Side wall
0.05, 0.1	0.15, 0.2, 0.25	0.005	1.06×10^7	Open, Closed
		0.01	8.49×10^7	
		0.02	6.79×10^8	
		0.04	5.43×10^9	
		0.06	1.83×10^{10}	

산한 Ra_s 수는 $1.06 \times 10^7 \sim 2.91 \times 10^{10}$ 에 해당한다. 실험은 측면 벽이 없는 경우부터 먼저 수행하였고 측정 순서는 평판의 면적이 작은 것에서부터 큰 것으로 두 평판 사이의 거리를 좁은 것부터 증가시키면서 수행하였다. 측정이 끝나면 측면 벽이 있는 경우에 대해 같은 순서로 측정을 수행하여 측면 벽의 영향을 살펴 보았다.

4-2 환 자연대류

Table 4는 환이 부착된 경우에 대한 실험범위이다.

구리판은 가로(W) 0.15m, 세로(L) 0.05m, 그리고 판의 두께 0.01m로 일정하게 하여 흰의 두께와 높이, 흰 사이의 간격만을 변화시켜 다양한 배열에 대해 측정을 수행하였다. 이때 흰의 두께(t)는 0.0025m, 0.005m이고 높이(H)는 0.0025m, 0.005m이고, 흰 사이의 간격은 0.0025m, 0.005m, 그리고 0.010m이다. 이 각각의 경우에 대하여 두 판 사이 거리(s)를 0.015~0.07m로 변화시켰다. 이에 해당하는 Ra_s 수는 $2.87 \times 10^8 \sim 2.91 \times 10^{10}$ 였다. 실험은 흰이 존재하는 상부 판에 대해 측면 벽이 존재하지 않는 경우에서 Case 1부터 Case 5까지의 순서로 진행하고 각 Case에서 두 판 사이거리를 좁은 것부터 증가시키면서 수행하였다.

5. 결 과

5-1 수평평판 자연대류 열전달

Fig. 6은 본 실험방법의 적용가능성 여부를 검증하기 위하여 McAdams가 제시한 단일 수평평판에서 개발된 열전달 상관식 (2)과 비교한 것이다. 비교결과, 실험결과는 기존의 알려진 열전달 상관식을 잘 예측할 수 있음을 보였다. 따라서 본 실험방법론을 적용하여 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달 및 흰에서의 자연대류 열전달 현상을 적용하는데 문제가 없다는 것을 확인할 수 있었다.

5-2 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달

Fig. 7은 실험에서 측정된 Nu_s 수를 Table 1의 기존의 알려진 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달 상관식과 비교한 결과이다. 그림에서 폐도형은 측면 벽이 있는 경우이고 개도형은 측면 벽이 없을 때의 측정결과이며 여러 가지 모양의 도형은 특성길이를 $L_c(L_c=A/P)$ 로 계산했을 때의 결과이다. 측면 벽의 존

재가 열전달에 미치는 영향이 있지만 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 7에서 열전달 상관식마다 예측하는 Nu_s 의 차이는 Prandtl 수가 연구마다 서로 달랐기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 식 (4)와 (6)에 나타난 Dropkin과 Somerscales⁽¹¹⁾ 그리고 Globe와 Dropkin⁽¹³⁾의 결과와 유사한 경향을 보인다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 측면 벽이 있을 때와 없을 때 Ra_{Lc} 수에 따른 Nu_{Lc} 수의 변화를 나타낸 것이다. Ra_{Lc} 수가 증가함에 따라 즉, 평판의 면적이 커짐에 따라 Nu_{Lc} 수는 증가하였다. 이러한 원인은 평판의 면적이 커지면 Benard cell 수가 증가하기 때문에 열적 교환이 잘 이루어지기 때문이라 판단된다. 각각의 도형은 두 평판 사이의 거리를 나타내는데 도형의 모서리 개수가 많아질수록 두 평판 사이의 거리(s) 또한 커지는 것을 의미한다. Ra_{Lc} 수가 같을 때 열전달은 두 평판 사이의 거리에 따라 달라짐을 확인할 수 있다. 거리가 좁아지면 열전달이 향상되었고 거리가 벌어질수록 열전달에 변화가 없었다.

Fig. 9는 측면 벽이 있을 때와 없을 때 두 평판 사이의 거리에 따른 열전달의 변화를 나타낸 것이며 (a)~(f)는 Ra_{Lc} 수 5.6×10^8 , 6.79×10^8 , 7.68×10^8 , 2.29×10^9 , 3.14×10^9 , 그리고 3.87×10^9 중 6가지이다. 개도형은 측면 벽이 없는 경우이며 폐도형은 측면 벽이 있는 경우이다. 단일 수평평판 자연대류의 Nu_{Lc} 수를 실선으로 나타내었다.

Fig. 9의 (a)~(f)에서 거리와 측면 벽의 유무에 따른 열전달의 영향을 뚜렷이 볼 수 있다. 모든 경우에 대해 거리가 좁아질수록 열전달이 향상되는 것이 관찰되었다. 이러한 원인은 하부의 가열 벽과 상부의 차가운 벽에서 발생한 유동의 상호작용에 의해 열교환이 빠르게 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 또한 측면 벽이 없는 경우의 열전달이 있는 경우보다 높았다. 이는 앞서 설명했듯이 측면으로부터 외부의 차가

Table 4. Test matrix of finned plate ($L=0.05m$, $W=0.15m$, $B=0.01m$).

	t (m)	G (m)	H (m)	s (m)	Top plate	Side wall
Case1	0.005	0.005	0.005	0.015,	Flat plate, finned plate	Open, closed
Case2	0.005	0.005	0.0025	0.02,		
Case3	0.005	0.0025	0.005	0.03,		
Case4	0.0025	0.005	0.005	0.05,		
Case5	0.0025	0.010	0.005	0.07

Fig. 6. Comparison of the test results with the existing correlation developed on the horizontal plate.

Fig. 7. Comparison of the test results with the existing correlation.

(a) Closed side wall

(b) Open side wall

Fig. 8. Nu_{Lc} & Ra_{Lc} for closed and open side wall in two horizontal plates.

운 유체가 유입됨에 따라 C loop 형태의 유동패턴이 발생해 온도차를 증가시켰기 때문이다. 그러나 거리가 벌어지면서 Nu_{Lc} 수는 급격하게 감소하다가 $0.04m$ 이상부터는 측면 벽의 영향은 관찰되지 않았다. 이때의 Ra_s 수는 5.43×10^9 이었다. 상하부 평면의 거리가 충분히 증가하면 열전달은 항상 일정했으며 실선으로 나타낸 단일 수평평판 자연대류 열전달과 같아졌다. 본 실험에서는 두 평판 사이의 거리가 $0.04m$ 이상이 되면 하단의 가열벽이 상단의 차가운 벽을 인식하지 못하기 때문에 이와 같은 현상이 나타난 것이라 판단된다.

5-3 흰 자연대류 열전달

Fig. 10과 11은 흰의 높이(H)와 흰 사이의 간격(G)이 열전달에 미치는 영향에 대해 두 벽면 사이의

거리에 따라 나타낸 그래프이다. 그림에서 마름모는 위와 아래 벽이 흰이 달린 경우이고 삼각형은 아래 벽만 흰이 달린 구조이다. 폐도형은 측면 벽이 있을 때이고 개도형은 측면 벽이 없을 때를 나타낸다. 두 그림에서 모두 두 벽면 사이의 거리가 증가하면서 열전달이 감소하다가 본 실험에서는 $0.05m$ 이상부터는 일정해지는 것을 볼 수 있다. 이때의 Ra_s 수는 1.06×10^{10} 이었다. 또한 측면 벽이 없는 경우의 열전달이 있는 경우보다 높았는데 이는 앞서 5.2절에서 설명한 바와 같이 외부로부터 차가운 유체가 유입되어 온도차가 증가했기 때문이다.

Fig. 10의 (a)와 (b)에서 상하부 평면에 흰이 달린 경우 하부 평면에만 흰이 달린 것보다 열전달이 높았다. 이는 열전달 면적이 증가하여 열전달이 상승했기 때문이며 흰의 높이가 다른 (a)와 (b)의 경우를 비교

Fig. 9. The effect of separation distance.

Fig. 10 The effect of fin's height (H) depending on separation distance.

Fig. 11 The effect of distance (G) between fins depending on separation distance.

Fig. 12 Comparison of Nu_{Lc} for each geometry depending on separation distance.

해보면 높이가 큰 경우인 (a)가 (b)보다 열전달이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 흰 사이의 간격(G)에 따른 열전달의 영향이다. 간격이 작은 (b)의 경우가 (a)보다 열전달이 높았다. 이는 흰 사이의 간격이 좁아지면 흰의 개수가 증가하여 열전달 면적이 늘어났기 때문이다.

5-4 세 가지 기하구조에서의 자연대류 열전달 비교

Fig. 12의 (a)와 (b)는 세 가지 기하구조에서 측정된 열전달을 비교한 결과이다. 사각형은 상하부 평면이 평평한 경우이고, 삼각형은 하부평면에만 흰이 달린 경우이고 마름모는 상하부평면 모두 흰이 달린 경우이다. 측면 벽이 있을 때(a)와 없을 때(b) 모두 열전달의 크기는 마름모가 가장 높았고 다음은 삼각형, 사각형의 순서였다. 이 실험 결과를 통하여 노심용융시 산화용융물층의 표면이 평평하지 않고 흰이 달린 것처럼 불규칙할수록 열전달이 향상되는 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 11과 12의 흰의 높이와 흰 사이의 간격에 대한 결과를 통해 알 수 있는 것은 피막층의 높이가 커지거나 피막층 간격이 작아지면 열전달을 향상시킬 수 있다는 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 자연대류 열전달 현상을 상사성 원리를 이용하여 물질전달 실험으로 모사하고 Rayleigh-Benard 자연대류에 대하여 두 판 사이의 거리와 측면 벽의 유무 및 두 판의 기하구조가 열전달에 미치는 영향에 대해 실험적으로 연구하였다.

수평평판 자연대류 물질전달에서 측정한 열전달은 McAdams가 수평평판에서 개발한 자연대류 열전달 상관식과 일치하였다.

Rayleigh-Benard 자연대류 실험결과 열전달은 측면 벽의 유무와 상하부 평판 사이의 거리 및 판의 기하구조에 따라 달라졌다. 측면 벽이 있는 경우의 열전달은 없는 것보다 항상 높았다. 이는 외부로부터 차가운 유체가 유입되어 온도차를 증가시켰기 때문에 열전달이 향상된 것이다.

상하부 평판 사이의 거리가 작아지면 열전달이 향상됐고 거리가 커지면 열전달이 감소하다가 어느 지점 이상부터는 하부의 평판이 상부의 평판을 인식

하지 못하기 때문에 단일 수평평판 자연대류 열전달과 같아졌다. 흰의 높이가 커져서 열전달 면적이 늘어나거나 흰 사이의 간격이 좁아져서 흰의 개수가 늘어난다면 열전달이 향상되었다. 또한 상하부 평판에 모두 흰이 달린 경우가 열전달이 가장 높았고 그 다음은 하부 평판에만 흰이 달린 경우였고 상하부 평판이 평평한 경우가 가장 열전달이 낮게 측정되었다.

본 연구는 중대사고시 노심용융물의 Rayleigh-Benard 자연대류 문제 및 지금까지 잘 알려지지 않은 금속용융물층과 산화용융물층 사이에 존재하는 고체 피막층이 열전달에 미치는 영향에 대한 예비실험으로써 수행되었다.

기 호 설 명

A	: 판의 면적 (m^2)
B	: 판의 두께 (m)
D_m	: 확산계수 (m/s^2)
G	: Fin 사이 간격 (m)
g	: 중력가속도 ($9.8 m/s^2$)
Gr_s	: Grashof number ($g\beta\Delta Ts^3/\nu^2$)
H	: Fin의 높이 (m)
h_h	: 대류열전달계수 ($W/m^2\cdot K$)
h_m	: 물질전달계수 (m/s)
k	: 열전도계수 ($W/m\cdot K$)
L	: 판의 가로 (m)
Nu_s	: Nusselt 수 ($h_h s/k$)
Nu_{Lc}	: Nusselt 수 ($h_h Lc/k$)
P	: 판의 둘레 (m)
Pr	: Prandtl 수 (ν/α)
Ra_s	: Rayleigh 수 ($g\beta\Delta Ts^3/\alpha\nu$)
Ra_L	: Rayleigh 수 ($g\beta\Delta T(Lc)^3/\alpha\nu$)
s	: 두 판 사이 거리 (m)
t	: Fin의 두께 (m)
W	: 판의 세로 (m)

Greek symbols

α	: 열확산계수 (m^2/s)
β	: 부피팽창계수 (m^3/K)
ν	: 동점성계수 (m^2/s)
ρ	: 밀도 (kg/m^3)

Subscripts

- S : 채널의 간격 (m)
 L_c : 가열부 길이 (m) (A/P)

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단이 지원한 원자력대학생 논문연구사업(NtUss)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. H. Song et al., Strategy for the Development of Severe Accident Analysis Technology, Korea Atomic Energy Research Institute, 2009.
2. S. K. Choi, S. O. Kim, Analysis of Rayleigh-Benard natural convection, Korean Society for Computational Fluids Engineering, 2008, 13, 62-68.
3. Adrian Bejan, Convection Heat Transfer : 3rd Edition, 1948, 275-277.
4. O. Mance et al. Experimental analysis of thermal instability in natural convection between horizontal parallel plates uniformly heated, ASME, 2007, 122, 50-57.
5. 박래준 외 4명, 피막층 형성이 있는 노심용융물의 자연대류 열전달에 대한 연구, KAERI, 1999.
6. T. G. Theofanous et al., In-vessel coolability and retention of a core melt, Nuclear Engineering and Design, 1997, 169, 1-48.
7. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 1990.
8. Oquz Turgut, Nevzat Onur, An experimental and three-dimensional numerical study of natural convection heat transfer between two horizontal parallel plates, Heat and Mass Transfer, 2007, 34, 644-652.
9. Andrej Horvat, Ivo Kljenak, Dynamic behavior of the melt pool at severe accident conditions, Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9) San Francisco, California, 1999.
10. T. Y. Chu, R. J. Goldstein, Turbulent convection in a horizontal layer of water, J. Fluid Mech., 1973, 60, 141-159.
11. D. Dropkin, E. Somerscales, "Heat Transfer by natural convection in liquids confined by two parallel plates which are inclined at various angles with respect to the horizontal", Trans. ASME C: J. Fluid Mech., 1965, 23, 337-353.
12. R. J. Goldstein, S. Tokuda, Heat transfer by thermal convection at high Rayleigh numbers, Intl J. Heat Mass Transfer, 1980, 23, 738-740.
13. S. Globe, D. Dropkin, Natural convection heat transfer in liquids confined by two horizontal plates and heated from below, Trans. ASME, 1959, 81, 24-28.
14. R. J. Goldstein et al., High-Rayleigh-number convection in a horizontal enclosure, J. Fluid Mech., 1990, 213, 111-126.
15. F. Heslot et al., Transitions to turbulence in helium gas, Phys. Rev., 1987, 36, 5870-5873.
16. S. A. Nada, "Natural convection heat transfer in horizontal and vertical closed narrow enclosures with heated rectangular finned base plate", Heat and Mass Transfer, 2007, 50, 667-679.
17. M. Mobedi, H. Yuncu, A three dimensional numerical study on natural convection heat transfer from horizontal rectangular fin array, Heat and Mass Transfer, 2003, 39, 267-275.
18. Eric Arquis and Mohamed Rady, Study of natural convection heat transfer in a finned horizontal fluid layer, Thermal Sciences, 2005, 44, 43-52.
19. F. HARAHA and H. N. McMANUS, JR., Natural convection heat transfer from horizontal rectangular fin arrays, Journal of Heat Transfer, 1967, 89, 32-38.
20. Senol Baskaya, Mecit Sicioglu, and Murat Ozek, Parametric study of natural convection heat transfer from horizontal rectangular fin arrays, Heat and Mass Transfer, 1999, 42, 2897-2903.
21. Levich, V. G., Physicochemical Hydro-dynamics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1962.
22. Selman, J. R. and Tobias, C. W., Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique, Advances in Chemical Engineering, ELSEVIER, 1978, 10, 211-318.
23. Heo, J. H. and Chung, B. J., Visualization of Natural convection Heat Transfer on a Horizontal Cylinder using the Copper Electroplating System, Trans. of the KSME(B), 2011, 35, 43-51.
24. Kang, K. U. and Chung, B. J., The Effects of the Anode Size and Position on the Limiting Currents of Natural Convection Mass Transfer Experiments in a Vertical Pipe, Trans. of the KSME(B), 2010, 34, 1-8.