

## 중대사고시 금속용융물층의 냉각 조건과 높이가 열속 집중 현상에 미치는 영향

문제영·정법진<sup>†</sup>

경희대학교 원자력공학과

(2015년 2월 2일 접수, 2015년 3월 9일 수정, 2015년 3월 12일 채택)

### Focusing effect of a Metallic Layer according to the Cooling Condition and Height in a Severe Accident

Je-Young Moon, Bum-Jin Chung<sup>†</sup>

Department of Nuclear Engineering, KyungHee University

(Received 2 February 2015, Revised 9 March 2015, Accepted 12 March 2015)

#### 요 약

중대사고시 금속용융물층의 열속 집중 현상(Focusing effect)에 대해 상부와 측면벽의 냉각 조건과 높이를 변화시키면서 실험과 수치해석을 수행하였다. 유사성(Analogy) 원리를 이용해 열전달 실험 대신 물질전달 실험을 수행하였으며 황산-황산구리 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 채택하였다.  $Ra_H$  수  $8.49 \times 10^7 \sim 5.43 \times 10^9$  범위에서 상부와 측면벽의 냉각 조건을 세 가지로, 높이를 네 가지로 변화시키면서 열전달을 측정하였다. 상부만 냉각인 경우의 실험결과를 동일한 조건인 Rayleigh-Benard 자연대류 상관식과 비교한 바 Dropkin과 Somerscales, Globe와 Dropkin의 상관식과 매우 일치하였다. 측면벽만 냉각인 경우, 상부와 측면벽 모두 냉각인 경우, 상부만 냉각인 경우 순으로 열전달이 감소하였고, 냉각 조건을 고정한 상태에서 높이를 감소시킬수록 측면 열전달이 향상되었다.

**주요어** : 열속 집중 현상, 중대사고, 노심용융물, 유사성, 전기도금계

**Abstract** - Focusing effect of a metallic layer in a severe accident depending on the aspect ratios and cooling conditions of top plate and side wall was investigated. Experiments were carried out for Rayleigh numbers and aspect ratio in the range of  $8.49 \times 10^7 \sim 5.43 \times 10^9$ ,  $0.135 \sim 0.541$  respectively. In order to achieve high Rayleigh numbers, the heat transfer experiments were replaced by mass transfer experiments based on the heat and mass transfer analogy. A sulfuric acid-copper sulfate ( $H_2SO_4-CuSO_4$ ) electroplating system was adopted as the mass transfer system. The experimental results agreed well with the Rayleigh-Benard natural convection correlations of Dropkin and Somerscales and Globe and Dropkin. When compared with the standard Rayleigh-Benard problem, the cooling by the side wall is even higher than the top. For a shorter height, the interaction between the heated and cooled plumes increases due to decrease of the height. Thus, the heat transfer increases.

**Key words** : Focusing effect, Severe accident, Core melt, Analogy concept, Electroplating system

---

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Department of Nuclear Engineering, KyungHee University  
Tel : 031-201-3893 E-mail: bjchung@khu.ac.kr

## 1. 서론

중대사고(Severe accident)가 발생하여 노심용융물(Core melt)이 원자로 하반구에 재배치되면 두 가지 시나리오가 상정된다. 원자로가 손상되는 경우와 원자로가 건전성을 유지하는 경우이다. 전자의 경우 노외에 Core catcher를 설치하여 이후 진행되는 사고를 완화시킨다. 후자의 경우 노심용융물을 노내에 보존하기 위하여 원자로 외벽냉각(IVR-ERVC: In-Vessel Retention-External Reactor Vessel Cooling)이 채택된다. 따라서 외벽냉각(IVR-ERVC)만으로 냉각이 충분히 이루어지는지, 원자로가 녹지 않고 잘 버티는지에 대한 실험적 검증이 필요하다. 그러나 중대사고시 발생하는 현상들이 매우 불확실하고 복잡하며 해당되는  $Ra_H$  수의 영역이 높기 때문에 이와 관련된 실험적 연구가 어렵다. 또한 중대사고 연구들이 원자로에 적용을 목적으로 수행되어 현상학적 이해가 부족하다.

노심용융물이 원자로 하반구 재배치되면 금속용융물층은 내부 발열이 존재하지 않고 하부의 산화용융물층은 붕괴열로 인한 내부 발열이 존재하게 된다. 산화용융물층 내의 자연대류로 인해 금속용융물층은 열을 전달받는다. 금속용융물층의 상부는 복사가 이루어지고 측면은 냉각되기 때문에 내부에서 자연대류가 발생한다. 이러한 자연대류로 인해서 금속용융물층의 측면벽으로 열을 전달하게 되고 이때 열속 집중 현상(Focusing effect)이 발생한다[1]. 열속 집중 현상(Focusing effect)은 금속용융물층 상부의 열전달 특성과 금속용융물층의 두께에 큰 영향을 받는다. 학자들에 의해 종횡비( $H/R$ )가 0.3~1.0인 범위에 대한 실험적 연구가 많이 수행되었으나 종횡비( $H/R$ )가 0.3보다 작은 경우는 실험 장치의 제약으로 인해서 수행된 경우가 적다. 또한 상부 열전달 특성에 관한 현상학적 연구가 미흡하다.

본 연구는 중대사고시 금속용융물층의 열속 집중 현상(Focusing effect)으로 인한 내부 유동 변화를 확인하기 위해 실험과 수치해석을 수행하였다. 상부와 측면벽의 냉각 조건을 상부만 냉각인 경우, 측면벽만 냉각인 경우 그리고 상부와 측면벽 모두 냉각인 경우로 나누어 실험을 수행하였으며 높이( $H$ )는 0.01m~0.04m로 변화시켰다. 종횡비( $H/R$ )는 기존 연구 범위보다 작으면서 기존 연구의 범위를 포함하는 0.135~0.541로 설정하였다. 이는  $Ra_H$  수  $8.49 \times 10^7 \sim 5.43 \times 10^9$ 에 해당한다. 높은  $Ra_H$  수를 얻기 위해 유사성 원리(Analogy concept)를 이용하여 물질전달 실험을 수행하였고 황산-황산구

리( $H_2SO_4-CuSO_4$ ) 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 채택하였다. FLUENT 6.3을 이용하여 각 냉각 조건과 높이( $H$ )에 따른 내부 유동장의 변화를 확인하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2-1. 중대사고시 외벽냉각

중대사고는 설계기준사고(DBA: Design Basis Accident)를 초과하여 노심손상을 야기하는 사고를 말한다. 중대사고가 진행되면 산화된 피복재 물질과 핵연료가 용융되어 노심 하부로 재배치되고 용융풀을 형성한다. Fig. 1과 같이 노심용융물은 밀도차에 의해 하부의 산화용융물층( $UO_2, ZrO_2$ )과 상부의 금속용융물층( $Fe, Zr$ )으로 분리된다. 하부의 산화용융물층은 붕괴열로 인해 내부발열을 하고 상부의 금속용융물층으로 열을 전달한다. 내부 열원이 없는 금속용융물층에서는 산화용융물층에서 전달받은 열을 상부와 측면벽으로 전달한다. 이로 인해 금속용융물층 내부에서 자연대류가 발생한다[2].

재배치된 용융풀은 지속적으로 붕괴열을 발산하므로 효과적인 냉각 수단이 없는 경우 원자로 용기 자체에 극심한 열적, 구조적 위험을 유발할 수 있다<sup>(3)</sup>. 중대사고시 노심용융물을 노내억류(IVR: In-Vessel corium Retention)하기 위한 방안으로 원자로 용기 외벽냉각(ERVC: External Reactor Vessel Cooling)이 채택된다[1].

노심용융물이 재배치된 후, 외벽냉각(IVR-ERVC)이 이루어지면 산화용융물층의 자연대류, 금속용융물층의 자연대류로 인해 원자로 용기에 가해지는 열적부하, 원자로 용기 외벽에서 발생하는 핵비등(Nucleate boiling), 노외 구조물에 의한 유속 변화 등의 현상들이 관

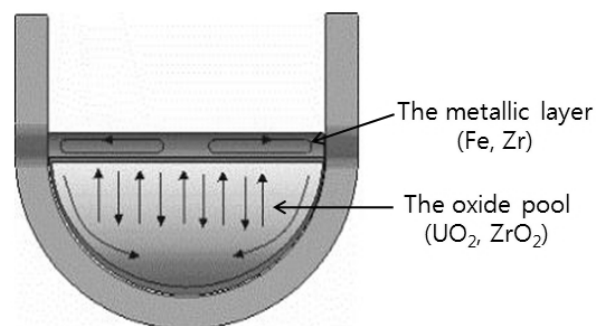


Fig. 1. Distribution of relocated molten core material [2].

심사가 된다.

**2-2. Rayleigh-Benard 자연대류 열전달**

금속용융물층은 하부의 산화용융물층으로부터 가열되고 상부로부터 냉각되는 전형적인 Rayleigh-Benard 자연대류에 측면벽에 의한 추가적인 냉각이 발생한다 [4]. 특성길이로는 높이(H)를 사용한다[5]. Fig. 2는 Rayleigh-Benard 자연대류에서 발생하는 유동패턴이다. 측면이 막혀 있는 구조로써 하단에서는 가열된 플룸(Plume)이 상승하고 상단에서는 차가운 플룸이 하강하여 Cell을 형성한다[6]. 이러한 Cell은 Fig. 2의 형태로만 유지되는 것이 아니라 Cell의 병합, 분리, 간섭 등 복합적인

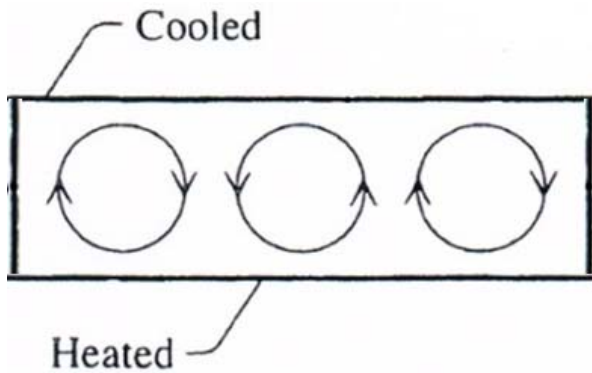


Fig. 2. Cellular flow pattern of Rayleigh-Benard natural convection [6].

변화를 보인다. 금속용융물층에서의 Rayleigh-Benard 자연대류 현상은 무엇보다도 높이(H)와 냉각조건에 따른 Cell의 변화와 이에 따른 열전달 변화가 중요하다. 특히 측면벽에 열속이 집중되는 열속 집중 현상(Focusing effect)은 중대사고시 원자로 용기의 건전성을 위협하는 중요한 요소이다.

Rayleigh-Benard 자연대류 열전달에 대해서는 실험적·수치적으로 여러 학자들에 의하여 연구가 수행되었으며 그 결과 도출된 상관식은 Table 1에 나타내었다[7-11].

**2-3. 열속 집중 현상(Focusing effect)**

금속용융물층은 하부의 산화용융물층에서 전달되는 열에 의해 가열되며 사고 진행에 따라 상부 표면에서 냉각수에 의한 열제거 또는 복사에 의한 열제거가 이루어진다. 금속용융물층은 산화용융물층으로부터 전달되는 열에너지가 노심용융물 상부로 제거되는 것을 방해하는 차폐 역할을 하며 그 자체가 가열되어 원자로용기 측면에 열속 집중 현상(Focusing effect)을 유발한다[1].

이 현상에 직접적인 영향을 미치는 것은 금속용융물층의 두께와 상부 표면에서의 열전달 특성이다. 금속용융물층의 두께와 관련된 변수는 종횡비(Aspect ratio, H/R)가 사용된다.

Liu와 Theofanous는 열속 집중 현상(Focusing effect)

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

Scholars	Correlations	Criteria
Heslot et al. [7]	Laminar $Nu_H = 1 + 0.096Ra_H^{0.333}$	$Pr = 0.8$ $3 \times 10^5 < Ra_H < 4 \times 10^7$ (1)
	Turbulent $Nu_H = 1 + 0.02Ra_H^{0.282}$	$Pr = 0.8$ $4 \times 10^7 < Ra_H < 10^{11}$ (2)
Chu and Goldstein [8]	$Nu_H = 0.183Ra_H^{0.278}$	$Pr = 6$ $2.76 \times 10^5 < Ra_H < 1.05 \times 10^8$ (3)
Goldstein et al.[9]	Laminar $Nu_H = 0.0722Ra_H^{0.330}$	$Pr = 2,750$ $1 \times 10^6 < Ra_H < 3 \times 10^9$ (4)
	Turbulent $Nu_H = 0.0659Ra_H^{1/3}$	$Pr = 2,750$ $3 \times 10^9 < Ra_H < 5 \times 10^{12}$ (5)
Dropkin and Somerscales [10]	$Nu_H = 0.069Pr^{0.074} Ra_H^{1/3}$	$Pr = 8,000$ $2 \times 10^5 < Ra_H < 7 \times 10^8$ (6)
Globe and Dropkin [11]	$Nu_H = 0.0665Pr^{0.083} Ra_H^{0.335}$	$Pr = 8,000$ $3 \times 10^7 < Ra_H < 7 \times 10^8$ (7)

에 대해 하부에서 가하는 열속을 변화시키면서 상부와 측면으로 전달되는 열속의 차이를 확인하기 위해서 실험적 연구를 수행하였다[12]. MELAD(Metal Layer Demonstration)라는 실험 장치를 이용하여 2D 실험을 수행하였으며 작동유체는 물을 사용하였다. 하부를 가열시키고 상부는 냉각, 왼쪽 측면은 단열조건으로 고정하였다. 오른쪽 측면은 단열과 냉각조건으로 변경하였다. 그들은 하부의 열속이 증가할수록 상부와 측면에서 측정되는 열속이 증가함을 확인하였으며 상부보다 측면에서의 열속이 큰 값을 보인다고 보고하였다. Massimo Corcione는 하부는 가열되고 상부는 냉각되는 수평 기하구조(Horizontal enclosure)에서 측면의 열 경계 조건을 변화시키면서 열전달과 유동 패턴의 변화를 확인하는 수치해석 연구를 수행하였다[13]. 종횡비(L/H)의 범위는 0.66~8이며,  $Ra_H$  수의 범위는  $10^3 \sim 10^6$ 이다. 높이(H)가 감소할수록 즉, 종횡비(L/H)가 증가할수록 Cell 수가 증가하면서 열 교환이 활발해지기 때문에 열전달이 향상된다고 보고하였다.

**2-4. 전기도금계를 이용한 상사성 실험방법**

열전달과 물질전달은 상사(Analogy)가 성립하므로 경계조건을 일치시키면 열전달 문제를 물질전달 문제로 변환할 수 있다. 이러한 물질전달계와 열전달계의 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[14]에 의해 처음으로 시도되었으며 Selman과 Tobias[15]는 여러 가지 조건에서 개발된 물질전달 상관식을 체계적으로 정립하였다. 무차원수를 계산하는데 필요한 물성치를 알기 위해 Fenech와 Tobias[16]가 제시한 관계식(8)~(16)을 사용하였다. 이와 같은 물성치는 22°C에서 5% 이내의 오차로 잘 맞는다고

알려져 있다.

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[17,18]. 상사성을 이용한 실험기법에 대해 보다 자세한 설명은 Kang과 Chung[19]의 논문에 제시되어 있다.

$$\begin{aligned} \rho [g/cm] = & 0.9978 + 0.06406 C_{H_2SO_4} - 0.00167 C_{H_2SO_4}^2 \\ & + 0.12755 C_{CuSO_4} - 0.01820 C_{CuSO_4}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu [cP] = & 0.974 + 0.1235 C_{H_2SO_4} + 0.0556 C_{H_2SO_4}^2 \\ & + 0.5344 C_{CuSO_4} + 0.5356 C_{CuSO_4}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mu D_{mCuSO_4} [cm^2/s] = & (0.7633 + 0.00511 C_{H_2SO_4} + \\ & 0.02044 C_{CuSO_4}) \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mu D_{mH_2SO_4} [cm^2/s] = & (1.6691 + 0.24519 C_{H_2SO_4} + \\ & 0.96637 C_{CuSO_4}) \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (11)$$

$$t_{Cu^{2+}} = (0.2633 - 0.1020 C_{H_2SO_4}) C_{Cu^{2+}} \quad (12)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C_{CuSO_4} (\beta_{CuSO_4} - \beta_{H_2SO_4} \frac{\Delta C_{H_2SO_4}}{\Delta C_{CuSO_4}}) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C_{H_2SO_4}}{\Delta C_{CuSO_4}} = & -0.000215 + 0.113075 \gamma^{1/3} + \\ & + 0.85576 \gamma^{2/3} - 0.50496 \gamma \end{aligned} \quad (14)$$

**Table 2.** Dimensionless group for analogy systems.

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

$$\gamma = \frac{C_{CuSO_4}}{C_{CuSO_4} + C_{H_2SO_4}} \quad (15)$$

$$\beta_j = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial C_j} \right]_{T, C_{k \neq j}} \quad (16)$$

전기도금계를 이용하여 물질전달계수( $h_m$ )를 구할 때, 음극 표면에서의 구리이온 농도를 알기 어렵기 때문에 한계전류법을 이용한다[20]. 전기도금계에서 전극 사이에 인가된 전위차를 증가시키면 전류가 증가하다가 더 이상 증가하지 않는 플레토우(Plateau)영역이 나타나는데 이를 한계전류(Limiting current)라 한다. 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이온 농도를 0으로 취급할 수 있기 때문에 아래의 식(17)을 이용해 물질전달계수인  $h_m$ 을 모액농도인  $C_b$  그리고 한계전류밀도인  $I_{lim}$  만으로 구할 수 있다.

$$h_m = \frac{(1-t_n)I_{lim}}{nFC_b} \quad (17)$$

### 3. 실험 방법

#### 3-1. 실험 장치

Fig. 3은 실험장치의 개략도이다. 실험 장치는 하부와 상부 그리고 측면벽으로 구성된 원통형(Cylinder)으로 제작되었다. 하부는 가열벽면(Heated wall) 역할을 하므로 구리판을 배치하였고, 상부는 차가운 벽면(Cold wall)의 역할을 할 때는 구리판을 그리고 단열벽면(Adiabatic wall)의 역할을 할 경우에는 아크릴판을 배치시켰다. 측면벽 또한 구리판과 아크릴판으로 각각 제작하여 벽면 조건에 따라 달리하여 사용하였다. 이 실험 장치를 가로, 세로, 높이가 0.3m, 0.4m, 0.3m인 아크릴 수지로 제작된 수조에 담가서 실험을 수행하

였다. 이 수조는 실험 장치를 여유 있게 가둘 수 있도록 충분한 크기로 제작되었다.

황산구리( $CuSO_4$ ) 농도는 0.05M이며 황산( $H_2SO_4$ )을 1.5M 용해시켜 전기영동으로 인한 효과를 억제하였다. 전원공급장치는 VüPOWER사의 DC Power supply-IPS-18B10이며, 전압과 전류측정은 Fluke-45사의 15B를 사용하였다.

#### 3-2. 실험 범위

Table 3은 실험 범위를 나타낸다. 실험은 반지름이 0.074m로 고정된 상태에서 높이( $H$ )를 0.01m, 0.015m, 0.02m, 0.04m로 변경하면서 수행되었다. 이에 해당하는  $Ra_H$  수 범위는  $8.49 \times 10^7 \sim 5.43 \times 10^9$ 이다. 높이( $H$ )에 따른 중형비( $H/R$ )는 Table 3에 나타내었다.

상부의 열전달 특성을 확인하기 위해서 냉각 조건을 세 가지로 설정하였다. 측면벽은 단열이고 상부만 냉각인 경우, 상부는 단열이고 측면벽만 냉각인 경우 그리고 상부와 측면벽 모두 냉각인 경우이다. 실험은 냉각 조건 하나를 고정하고 높이( $H$ )가 낮은 순서부터 높은 순서로 진행하였다. 측정이 완료되면 냉각 조건을 변경하여 같은 순서로 측정을 수행하여 냉각 조건에 대한 영향을 확인하였다.

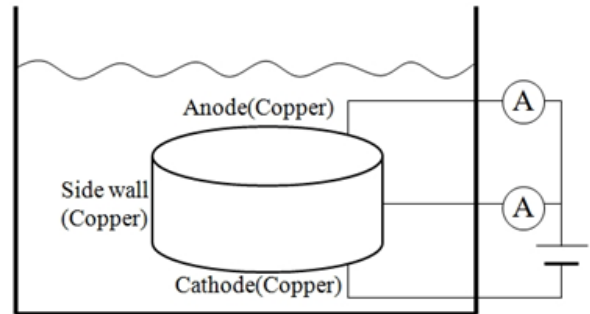


Fig. 3. Test section for Focusing effect.

Table 3. Test matrix for Focusing effect.

$Pr$	$R(m)$	$H(m)$	$H/R$	$Ra_H$	Cooling condition
2,014	0.074	0.01	0.135	$8.49 \times 10^7$	Top cooling only, Side cooling only, Top+side cooling
		0.015	0.203	$2.87 \times 10^8$	
		0.02	0.270	$6.79 \times 10^8$	
		0.04	0.541	$5.43 \times 10^9$	

### 4. 수치해석 방법

상부와 측면벽의 냉각 조건과 높이( $H$ )를 변경하였을 때, 내부 유동장의 변화를 확인하기 위해서 FLUENT 6.3을 사용하여 시뮬레이션(Simulation)을 수행하였다.

Table 4는 수치해석 범위를 나타낸다. 실험 결과와 수치해석 결과의 비교를 위해 냉각 조건을 상부와 측면벽 모두 냉각인 경우로 고정하고 각 높이( $H$ )에 대해 계산을 수행하였다. 이 중에서 높이( $H$ )가 0.01m, 0.04m 인 경우의 유동장 확인을 통해 높이( $H$ )에 따른 유동장 변화를 확인하였다. 그리고 상부와 측면벽의 냉각 조건에 따른 영향을 확인하기 위해서 높이( $H$ )는 0.04m 로 고정하고 냉각 조건을 세 가지로 변경하였다.

GAMBIT을 이용하여 원통형(Cylinder)의 3D 모델로 격자를 생성하였고 y-z 단면의 격자(Grid) 생성 모습을 Fig. 4에 나타내었다. 격자는 1개의 가열벽면(Heated wall), 2개의 냉각벽면(Cooled wall) 또는 단열벽면(Adiabatic wall)으로 구성되었다. 격자의 수는  $1.2 \times 10^6$  개로 가열벽면(Heated wall)과 냉각벽면(Cooled wall) 근처에는 조밀하게 형성하고, 바깥에는 성글게 생성하였다. 가열벽면(Heated wall)과 냉각벽면(Cooled wall)에

경계층(Boundary layer)을 만들었다.

FLUENT 6.3에서 층류모델(Laminar model)을 사용하였고, 압력, 운동량 그리고 에너지 항은 각각 Second Order와 Second Order Upwind Scheme을 사용하였다. 압력과 속도에 대해 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 알고리즘(Algorithm)을 사용하였다. 가열부 온도는 400K이고, 유체의 온도는 300K, 냉각벽 온도는 200K의 등은 경계조건을 적용하였다. Boussinesq 근사를 사용하고 중력 값은 y축인 유동이 흐르는 방향으로  $-9.8m/s^2$ 을 설정하였다.  $Pr$  수는 2,014이고, 이때의 물성치는 물질전달 실험과 동일하다.

### 5. 결과

#### 5-1. 실험 결과

Fig. 5는 상부만 냉각인 경우의 실험 결과와 Table 1의 Rayleigh-Benard 자연대류 상관식들을 비교한 것이다. 실험 결과를 원형, 삼각형, 사각형, 별형의 폐도형으로 나타내었고 도형에서 변이 증가하는 순으로 높이( $H$ )가 증가한다. 본 연구의 결과는 식(6)과 (7)에 나타난 Dropkin과 Somerscales 그리고 Globe와 Drop-

Table 4. Test matrix of FLUENT for Focusing effect.

$Pr$	$R(m)$	$H(m)$	$HR$	$Ra_H$	Cooling condition
2,014	0.074	0.01	0.135	$8.49 \times 10^7$	Top+side cooling
		0.015	0.203	$2.87 \times 10^8$	
		0.02	0.270	$6.79 \times 10^8$	
		0.04	0.541	$5.43 \times 10^9$	Top cooling only, Side cooling only, Top+side cooling

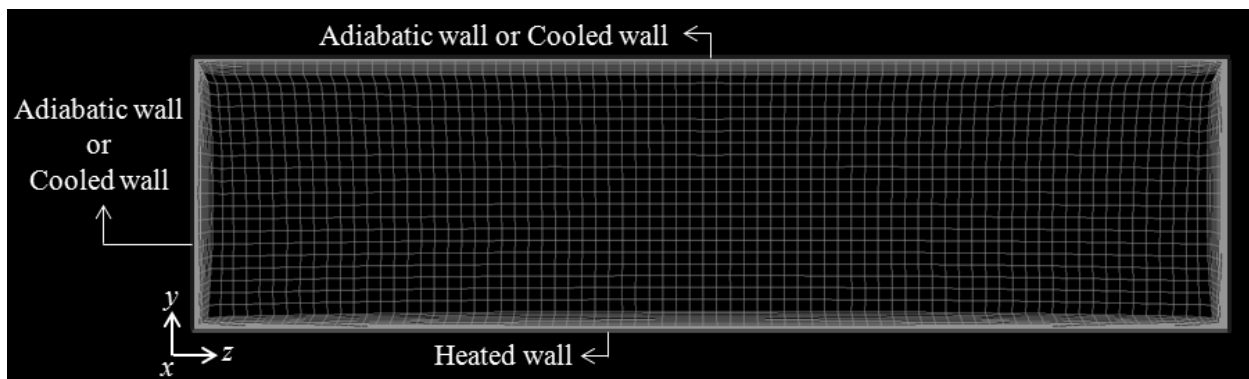


Fig. 4. The solution grid of y-z plane.

kin의 결과와 매우 일치하였다. 다른 상관식들은 이것들보다 낮은  $Nu_H$  수를 보였으나 기울기는 모두 유사하다. 이는  $Nu_H$  수에 영향을 미치는  $Ra_H$  수의 비례 관계가 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 6은 상부와 측면벽이 냉각되는 조건에 대하여 높이(H)에 따른 물질전달계수( $h_m$ ) 변화를 보여준다. 동일한 높이(H)에서 측면벽만 냉각인 경우, 상부와 측면벽 모두 냉각인 경우, 상부만 냉각인 경우 순으로 하부에서의 물질전달계수( $h_m$ )가 감소하였다. 이는 상부와 하부 사이의 열전달보다 측면벽과 하부 사이의 열전달이 크다는 것을 의미하며 상부의 냉각이 측면벽의 냉각 효과를 억제함을 알 수 있다. Massimo Corcione는 수치해석을 통해 하부와 상부 사이의 열전달보다 측면벽과의 열전달이 큰 것을 ‘Crossing’ 때

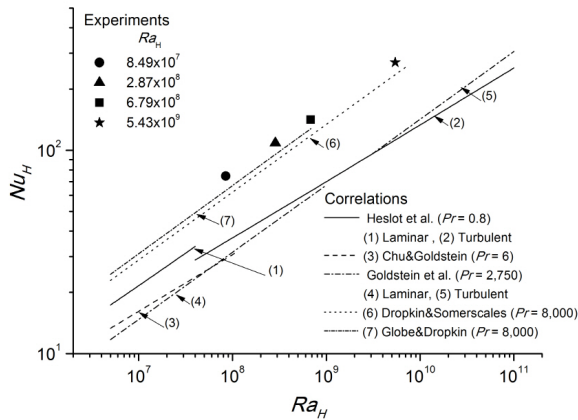


Fig. 5. Comparison of the test results with the Rayleigh-Benard correlations.

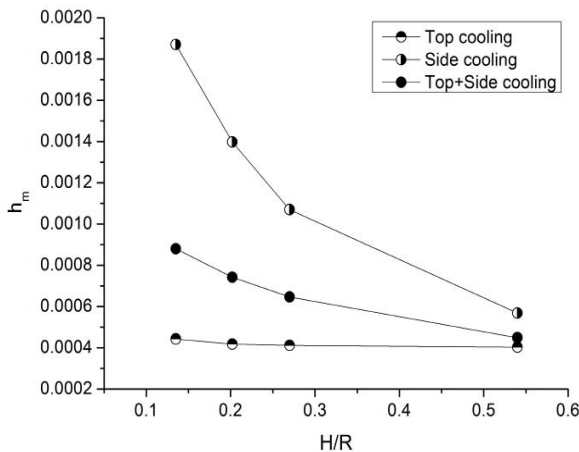


Fig. 6. Mass transfer coefficient( $h_m$ ) according to Aspect ratio( $H/R$ ).

문이라고 보고하였다[13].

같은 냉각조건에서 종횡비( $H/R$ )가 감소할수록 물질전달계수( $h_m$ )가 증가하였다. 이는 높이(H)가 감소하면서 하부와 상부, 하부와 측면벽의 열 교환이 활발해져 열전달이 향상된 것이라 판단된다. 이러한 현상은 측면벽만 냉각인 경우 더욱 심화되며 상부만 냉각인 경우는 종횡비( $H/R$ )에 따른 물질전달계수( $h_m$ ) 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다.

### 5-2. 수치해석 결과

Fig. 7은 실험 결과와 수치해석 결과를 비교한 것이다. 상부와 측면벽이 모두 냉각이고 높이(H)가 0.01m, 0.015m, 0.02m, 0.04m인 경우에 대한 실험 결과를 동일 조건의 수치해석 결과와 비교함으로써 수치해석 결과의 타당성을 검증하려고 한다. 실험 결과를 폐도형으로 나타냈으며 수치해석 결과를 개도형으로 표현하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 실험 결과와 수치해석 결과는 오차 5% 이내로 일치하였다.

Fig. 8은 높이(H)가 0.04m인 경우, 상부와 측면벽의 냉각조건을 변경하였을 때 내부 유동장을 나타낸다. Fig. 8(a)는 측면벽이 단열이기 때문에 측면벽에서 상승하는 유동이 형성된다. 상부의 차가운 유체가 중앙 부근으로 이동하여 하부로 하강하는 유동이 생기고 하부의 뜨거운 유체는 측면벽으로 이동하게 된다. 따라서 Fig. 8(a)와 같이 밖에서 안으로 회전하는 Cell이 형성된다.

Fig. 8(b)는 측면벽이 냉각벽이므로 측면벽에서 하강하는 유동이 형성됨을 확인할 수 있다. 상부는 단열

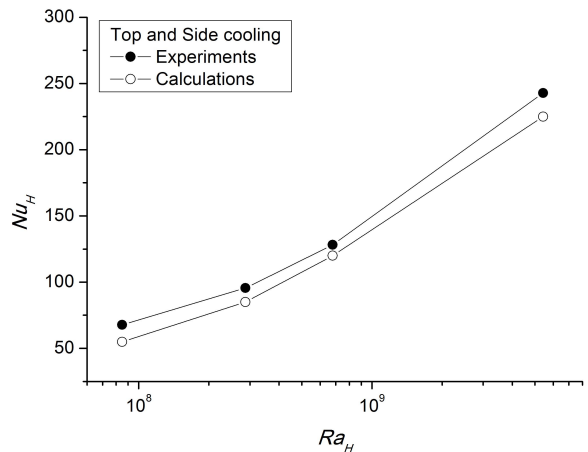
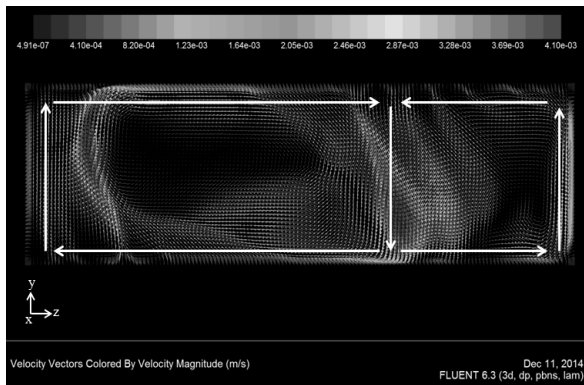
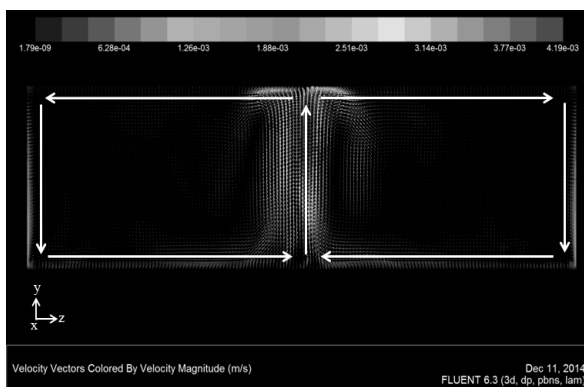


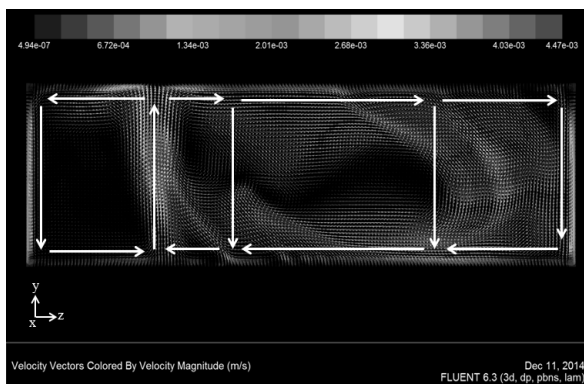
Fig. 7. Comparison of the experimental and numerical results.



(a) Top cooling only



(b) Side cooling only

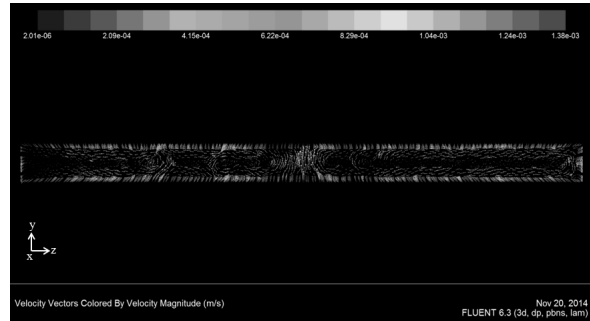


(c) Top and Side cooling

**Fig. 8.** Velocity vector depending on cooling condition.

상태이기 때문에 하부의 가열 벽면에서 강하게 상승하는 유동이 지배적이다. 따라서 Fig. 8(a)와는 반대 방향의 Cell이 형성되게 된다. 마지막으로, Fig. 8(c)에서는 상부와 측면벽이 모두 냉각 조건이기

때문에 유동이 앞선 두 경우보다는 복잡하다. 형성된 Cell의 방향은 Fig. 8(b)와 같지만 큰 Cell이 아닌 작은 Cell 여러 개로 나뉘게 된다. 여기서 주의해야 할



**Fig. 9.** Velocity vector of  $H=0.01m$  for Top and side cooling.

점은 Cell의 형성은 정상상태(Steady state)가 되더라도 매 순간 변화한다는 것이다. 정상상태(Steady state)에서의 Cell 특성은 Chaotic한 유동이므로 Fig. 8(a)~(c)와 같은 특성이 나타난 후에도 중심 부근이 이동하거나 Cell이 병합했다가 분리되는 등의 현상이 수시로 발생한다.

Fig. 9는 상부와 측면벽 모두 냉각이고 높이( $H$ )가  $0.01m$ 인 경우의 속도장이다. Fig. 8(c)는 동일한 냉각조건에서 높이( $H$ )가  $0.04m$ 인 경우의 속도장이므로 이와 비교하여 살펴보면 높이( $H$ )에 따른 내부 유동의 변화를 확인할 수 있다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 형성된 Cell 수가 Fig. 8(c)보다 많다. 높이( $H$ )가 감소함에 따라 Square cell의 개수가 증가하고 하부와 상부에서 발달된 플룸(Plume)의 열 교환이 더 빠르게 이루어지는 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 중대사고시 금속용융물층에서 발생하는 자연대류 열전달 현상을 물질전달과 열전달의 유사성(Analogy)을 이용하여 물질전달 실험으로 수행하였고 내부에서 발생하는 유동 현상 수치해석을 수행하였다. 상부와 측면벽의 냉각 조건과 높이( $H$ )에 따른 영향을 확인하기 위하여 냉각 조건은 세 가지로, 높이는 네 가지로 바꾸면서 실험을 수행하였다.

측면벽은 단열이고 상부만 냉각인 경우, 같은 조건인 Rayleigh-Benard 자연대류 상관식과 비교하여 일치함을 확인하였다. 또한 상부와 측면벽 모두 냉각인 경우, 높이( $H$ )를 변경한 실험 결과와 동일 조건의 수치 해석 결과가 매우 일치하였다.

열속 집중 현상(Focusing effect)은 상부와 측면벽의 냉각 조건과 높이( $H$ )에 영향을 받는다. 상부가 단열이고 측면벽이 냉각인 경우, 상부와 측면벽 모두 냉각인



경우, 측면벽은 단열이고 상부만 냉각인 경우 순으로 열전달이 감소하였다. 이는 하부 가열벽과 측면의 냉각벽이 거리상으로 가까우므로 열 교환이 활발하게 이루어지기 때문이다. 이러한 열전달 차이는 Cell의 크기와 방향에 영향을 받는다. 따라서 수치 해석을 통해 각 냉각 조건에서의 Cell 특성을 확인하였다.

종횡비( $H/R$ )가 감소할수록 즉, 높이( $H$ )가 감소할수록 열전달이 증가하였다. 내부 유동장을 통해 높이( $H$ )가 감소하면 Squire cell 수와 Cell의 회전 속도가 증가함을 확인하였다. Cell의 영향으로 상부, 하부 그리고 측면벽 사이의 열 교환이 활발해진다.

본 연구는 중대사고시 금속용융물층의 열속 집중 현상(Focusing effect)에 대한 현상학적 연구로서 수행되었다. 중대사고 연구는 적용성을 위해서 매우 큰 실험 장치로 실증 실험을 하는 경우가 많다. 그러나 본 연구에서는 유사성 원리(Analogy concept)를 이용해 소규모의 실험 장치로 열전달 현상을 물질전달로 모사하였다. 따라서 높은  $Ra_H$  수에 대해서 실험을 수행할 수 있었다.

이후 연구로는 상부와 측면벽에 서로 다른 온도를 설정하기 위해 상부에 저항을 연결하는 방법을 시도할 것이다. 저항을 연결함으로써 물질전달 실험에서 농도 변화가 발생하고 이는 온도 변화로 유사됨을 이용할 것이다. 이 방법을 통해 상부 온도가 측면벽 온도보다 높은 경우에 열속 집중 현상(Focusing effect)의 심화되는 정도를 알 수 있을 것이다. 또한 저항 연결로 인한 농도 변화에 따른 온도 변화를 밝혀낸다면 실험 방법론을 확장하는데 기여할 것이다.

### 기호설명

$C_b$	: Molar concentration of bulk [ $mole/m^3$ ]
$D_m$	: Mass diffusivity [ $m/s^2$ ]
$F$	: Faraday constant [96,485 <i>Coulomb/mole</i> ]
$Gr_H$	: Grashof number [ $g\beta\Delta TH^3/\nu^2$ ]
$g$	: Gravitational acceleration [ $9.8 m/s^2$ ]
$H$	: Height [ $m$ ]
$H/R$	: Aspect ratio
$h_h$	: Heat transfer coefficient [ $W/m^2 \cdot K$ ]
$h_m$	: Mass transfer coefficient [ $m/s$ ]
$I_{lim}$	: Limiting current density [ $A/m^2$ ]
$k$	: Thermal conductivity [ $W/m \cdot K$ ]
$Nu_H$	: Nusselt number [ $h_h H/k$ ]

$n$	: Number of electrons in charge transfer reaction
$Pr$	: Prandtl number [ $\nu/\alpha$ ]
$R$	: Radius of test section [ $m$ ]
$Ra_H$	: Rayleigh number [ $g\beta\Delta TH^3/\alpha\nu$ ]
$T$	: Temperature [ $K$ ]
$t_n$	: Transference number

### Greek symbols

$\alpha$	: Thermal diffusivity [ $m^2/s$ ]
$\beta$	: Volumetric expansion coefficient [ $1/K$ ]
$\nu$	: Kinematic viscosity [ $m^2/s$ ]
$\rho$	: Density [ $kg/m^3$ ]

### Subscripts

$b$	: Bulk
$H$	: Height

### 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부(MSIP)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구과제(NRF-2014M2A8A1030777)입니다.

### Reference

1. R.J. Park et al., Evaluation of In-Vessel Corium Retention under a Severe Accident, Korea Atomic Energy Research Institute, 2008, KAERI/TR-3537/2008
2. J.H. Song et al., Strategy for the Development of Severe Accident Analysis Technology, 2009, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/AR-834/2009
3. J.L. Rempe et al., In-Vessel Retention Strategy for High Power Reactors, 2005, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL/EXT04-02561
4. T. G. Theofanous et al., In-vessel coolability and retention of a core melt, Nuclear Engineering and Design, 1997, 169, 1-48
5. F. P. Incropera and D. P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 1990, WILEY, New York

6. Adrian Bejan, Convection Heat Transfer : 3rd Edition, 1948, 275-277
7. F. Heslot et al., Transitions to turbulence in helium gas, Phys. Rev., 1987, 36, 5870-5873
8. T. Y. Chu, R. J. Goldstein, Turbulent convection in a horizontal layer of water, J. Fluid Mech., 1973, 60, 141-159
9. R. J. Goldstein et al., High-Rayleigh-number convection in a horizontal enclosure, J. Fluid Mech., 1990, 213, 111-126
10. 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
11. 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
12. Liu and Theofanous, In-vessel coolability and retention of a core melt, 1996, 1, Appendix N
13. Massimo Corcione, Effects of the thermal boundary conditions at the sidewalls upon natural convection in rectangular enclosures heated from below and cooled from above, International Journal of Thermal Sciences, 2003, 42, 199-208
14. Levich, V. G., Physicochemical Hydro-dynamics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1962
15. Selman, J. R. and Tobias, C. W., Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique, Advances in Chemical Engineering, ELSEVIER, 1978, 10, 211-318
16. E. J. Fenech, C. W. Tobias, Mass Transfer by Free Convection at Horizontal Electrodes, Electrochimica Acta, 1960, 2, 311-325
17. Ko, S. H., Moon, K. W. and Chung, B. J., Applications of Electroplating Method for Heat Transfer Studies Using Analogy Concept, Nuclear Engineering and Technology, 2006, 38, 251-258
18. 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
19. Kang, K. U. and Chung, B. J., The Effects of the Anode size and Position on the Limiting Currents of Natural Convection Mass Transfer Experiment in a Vertical Pipe, Trans. of the KSME (B), 2010, 34, 1-8
20. Fenech, E. J. and Tobias, C. W., Mass transfer by free convection at horizontal electrode, Electrochimica Acta, 1960, 2, 311-325