

# 용융 금속의 고화층 증가가 자연대류 열전달에 미치는 영향

박래준\*, 최상민\*\*, 김상백\*\*\*, 김희동\*\*\*\*  
(1998년 7월 15일 접수)

## Effect of Crust Increase on Natural Convection Heat Transfer in the Molten Metal Pool

Rae-Joon Park, Sang-Min Choi, Sang-Baik Kim and Hee-Dong Kim

**Key Words :** Molten Metal Layer (금속 용융물 층), Crust Formation (고화층 형성), Natural Convection Heat Transfer (자연대류 열전달), Conducting Thermal Barrier(전도 열저항), Aspect Ratio Effect (종횡비 영향), New Correlation (새 상관식)

### Abstract

An experimental study has been performed on natural convection heat transfer with a rapid crust formation in the molten metal pool of a low Prandtl number fluid. Two types of steady state tests, a low and high geometric aspect ratio cases in the molten metal pool, were performed. The crust thickness by solidification was measured as a function of boundary surface temperatures. The experimental results on the relationship between the Nusselt number and Rayleigh number in the molten metal pool with a crust formation were compared with existing correlations. The experimental study has shown that the bottom surface temperature of the molten metal layer, in all experiments, is the major influential parameter in the crust formation, due to the natural convection flow. The Nusselt number of the case without a crust formation in the molten metal pool is greater than that of the case with the crust formation at the same Rayleigh number. The present experimental results on the relationship between the Nusselt number and Rayleigh number in the molten metal pool match well with Globe and Dropkin's correlation. From the experimental results, a new correlation between the Nusselt number and Rayleigh number in the molten metal pool with the crust formation was developed as  $Nu = 0.0923 (Ra)^{0.302} (2 \times 10^4 < Ra < 2 \times 10^7)$ .

#### 기호설명

- a : 상수
- AR : 종횡비(= l/c)
- b : 상수
- c : 용융물층 가로 길이, m
- $c_p$  : 정압 비열, J/(kg.K)
- d : 용융물층 초기 높이, m
- g : 중력가속도,  $m/s^2$

- h : 열전달계수,  $W/(m^2K)$
- k : 열전도도,  $W/(mK)$
- l : 용융물층 높이(= d-t), m
- Nu : Nusselt 수 (=  $hl/k$ )
- Pr : Prandtl 수(=  $\nu / \alpha$ )
- Ra : Rayleigh 수 (=  $g\beta \Delta T l^3 / (\alpha \nu)$ )
- t : 고화층 두께, m
- T : 온도,  $^{\circ}C$
- $\Delta T$  : 용융물층 상,하부 온도차이,  $^{\circ}C$

\* 회원, 한국원자력연구소 신행동력로개발단

\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\* 회원, 한국원자력연구소 신행동력로개발단

\*\*\*\* 회원, 한국원자력연구소 신행동력로개발단

#### 그리스문자

- $\alpha$  : 열확산계수(=  $k/(\rho c_p)$ ),  $m^2/s$
- $\beta$  : 체적팽창계수,  $1/K$
- $\nu$  : 동점성계수,  $m^2/s$

$\rho$  : 밀도,  $\text{kg/m}^3$

개 요

용융금속의 고화 및 내부에서의 자연대류 문제는 주형, 지질학, 냉동공학, 원자력의 안전성 등 여러 분야와 관련이 있다. 용융금속의 고화에 대해서는 주로 용융물이 냉각수와 직접 접촉하지 않고 간접적으로 접촉하는 방식과 대기를 통한 열전달로 서서히 고화되는 과정에 대하여 많이 연구되었다.<sup>(1)</sup> 또한 다성분 용융 금속이 서서히 고화될 때 액체와 고체가 공존하는 영역의 크기와 고화층의 불안정성 등에 대해서와 용융물의 경계조건에 따른 자연대류에 대해서도 많은 연구가 수행되었다.<sup>(2,3)</sup> 고화현상과 자연대류가 동시에 발생하는 복합 열전달 문제는 적용범위는 많지만 해석의 복잡성으로 관련 연구가 한정되어 있다. 특히 금속 용융물을 냉각하기 위하여 냉각수를 주입할 때 급격한 고화층 두께 증가가 용융물의 자연대류 열전달에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다.

용융 금속과 냉각수의 두 수평 유체가 직접 접촉하여 열전달되면서 하부의 용융금속이 급격히 고화되고 용융물 내부에서는 자연대류 열전달이 발생하는 것은 원자력 발전소에서 노심몰질이 용융하는 가상사고시 발생될 수 있다. 원전에서 냉각수 상실 등에 의하여 핵연료 물질 등이 용융하는 극단적인 경우에 용융 물질이 풀을 형성할 때 이를 냉각하기 위하여 냉각수인 물을 주입하게 되면 용융물 표면이 고화되어 용융물과 냉각수 사이에 고화층이 형성될 수 있다.<sup>(4)</sup> 이때 형성된 용융물은 구성성분의 밀도차이 때문에 Fig. 1에서 보는 바와 같이 밀도가 큰 핵연료( $\text{UO}_2$ )와  $\text{ZrO}_2$  등으로 구성된 산화 용융물과 밀도가 작은 철과 Zircaloy 등으로 구성된 금속 용융물층으로 분리될 수 있다. 이때 하부의 산화 용융물층에는 붕괴열(decay heat)의 내부 열원이 있기 때문에 내부발열의 자연대류 열전달이 발생하고, 상부의 금속 용융물층에서는 내부 열원이 없으므로 하부의 산화 용융물층으로부터 하부 가열되고 상부 냉각되는 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달이 발생한다. 이때 용융물을 냉각하기 위하여 냉각수를 용융물 상부에 주입하면 금속 용융물층 상부가 급격히 고화되어 고화층을 형성하게 된다. 따라서 본 연구 대상은 Fig.2에서 보는 바와 같이 산화 용융물층으로부터 하부가열 되는 금속 용융물층의 상부에 냉각수가 존재하여 상부냉각으로 고화층이 형성되는 경우이다

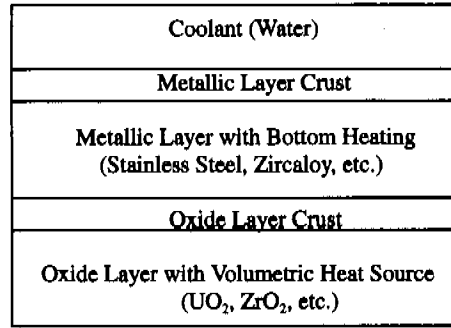
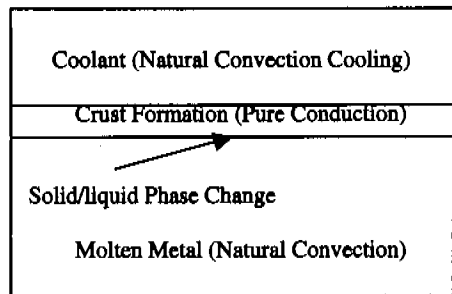


Fig. 1 Molten metal pool formation during a severe accident in a nuclear power plant.



Bottom Heating (Isothermal Condition)

Fig. 2 Schematic diagram of the problem definition.

용융물과 냉각수의 경계에 형성된 고화층은 용융물과 냉각수 사이의 열전달양에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 고화층이 전도 열저항(conducting thermal barrier) 역할을 하여 용융물의 냉각을 방해한다.<sup>(5-7)</sup> 따라서 용융물의 냉각특성을 정확하게 평가하기 위해서는 용융물과 냉각수의 초기 및 경계조건에 따른 용융물의 고화층 성장 과정과 고화층 주변의 열전달 과정을 정확하게 규명하여야 한다. 밀폐된 용기 하부에서의 가열과 상부에서의 냉각 형태인 Rayleigh-Benard 자연대류는  $Nu$  수를  $Ra$  수,  $Pr$  수, 종횡비(aspect ratio) 등의 함수로 나타낼 수 있는데 특히 그 중에서도  $Ra$  수와 밀접한 관계가 있다고 알려져 있으며, 일반적으로  $Ra$  수가 증가하고,  $Pr$  수가 증가하고, 종횡비가 감소할수록  $Nu$  수는 증가한다.<sup>(8,9)</sup> 용융물의 고화층 두께 증가에 따른  $Ra$  수의 급격한 감소는  $Nu$  수를 급격하게 감소시켜야 하나 고화층 두께 증가에 따른 용융물의 종횡비 감소가  $Nu$  수의 변화에 영향을 미친다.

본 연구에서는  $Pr$  수가 1 보다 작은 금속용융물의 종횡비 변화가 용융물의 자연대류 열전달에 미

지는 영향을 평가하기 위하여 용융물층의 초기 종횡비가 1/6 과 4/5 인 두 경우에 대한 정상상태 실험을 수행하였다. 즉, 용융물과 직접 접촉하는 냉각수의 자연대류로 용융물을 냉각하는 조건하에서 냉각수와 용융물의 경계조건에 따른 고화층 두께 변화와 열전달 특성을 분석하여 용융물의 냉각능력을 평가할 수 있는 기본적인 결과를 얻고자 하였다. 고화층 형성의 주요 인자인 용융물 내부의 자연대류 열전달양에 대한 실험결과는 Rayleigh-Benard 자연대류 조건에서 개발된 기존 상관식들과 비교.평가하였다. 또한 용융물의 고화층 증가에 따른 종횡비 변화가 자연대류 열전달에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 용융물층에서 Nu 수와 Ra 수 사이의 새 상관식을 개발하여 원전의 가상 중대사고를 모의하는 전산코드에 유용하게 사용할 수 있도록 하였다.

## 실험내용 및 장치

### 2.1 실험내용

본 연구에서는 원전의 중대사고시 노심과 원자로공동(cavity) 등에서 형성될 수 있는 용융물층의 종횡비를 모사하기 위하여 초기 종횡비가 1/6 과 4/5 인 두 실험용기를 제작하여 실험용기 상부에 설치한 열교환기와 하부에 설치한 히터 온도를 변화시키면서 용융금속의 고화층이 형성되는 과정을 측정하는 정상상태 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 용융물은 냉각수의 비등을 방지하기 위하여 용융온도가 100 °C 이하이고 Pr 수가 1 보다 작으며, 용융과 고화특성이 순수물질과 같은 성질을 가진 eutectic 물질을 사용하였다. 즉, 용융물로는 중량비(weight percentage)가 Bi 가 50 %, Pb 가 27 %, Sn 이 13 %, Cd 가 10% 각각 혼합되어 밀도가 9,383 kg/m<sup>3</sup>, 열전도계수가 18 W/m.K, Pr 수는 0.017, 용융온도가 70 °C 인 저온용융 합금물을 사용하였으며, 냉각수로는 여과한 물을 사용하였다. 본 실험에서 고화층 두께를 물리적으로 측정하는 것은 불가능하였기 때문에 실험용기 내에서 측정 한 온도를 이용하여 용융물의 고화는 금속의 용융 온도에서 시작한다는 조건을 적용하여 고화층 두께를 결정하였다. 이 방법의 적합성은 작은 용기에 용융물을 담고 그 하부를 냉각 고화시켜 상부를 부어 버림으로서 액상과 고상의 경계면을 관측하는 Pour-out 실험과 고화층 두께에 대한 불확실성 분석을 통하여 검증하였다.

### 2.2 실험장치

본 실험장치는 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 실험

용기, 냉각수 주입장치, 측정장치, 실험자료 제어 및 처리장치로 구분할 수 있다. 용융물층의 초기 종횡비가 1/6 인 실험용기는 가로 450 mm, 세로 150 mm, 높이 150 mm 이고 용융물층과 냉각수층의 깊이는 각각 75 mm 였다. 용융물층의 초기 종횡비가 4/5 인 실험용기는 가로 250 mm, 세로 150 mm, 높이 350 mm 이고 용융물층의 깊이는 200 mm 이고 냉각수층의 깊이는 각각 150 mm 였다. 본 실험에서는 실험용기 상부에 열교환기를 설치하고 이를 이용하여 상부 냉각수의 자연대류로 용융물을 냉각하여 고화층을 형성시켰으며, 하부에는 히터를 장착하여 용융물을 가열할 수 있도록 하였다. 실험용기 상부의 열교환기는 3 mm 얇은 구리판으로 제작하여 열이 잘 전달되도록 하였으며, 실험용기 하부는 5 mm 의 철판으로 제작하여 용융물의 중량을 견딜 수 있도록 제작하였다. 실험용기 좌우 측면은 철판을 사용하였으며, 앞면은 실험용기 내부를 육안으로 관찰할 수 있도록 내열유리를 사용하여 제작하였다. 실험용기 내부의 현상을 관측하는 앞면은 제외한 전 실험용기는 열손실을 최소화하기 위하여 Fibrefrax 절연체를 사용하여 절연하였다. 실험용기 하부에 장착한 히터는 종횡비가 작은 경우는 용량이 3 kW 였으며, 종횡비가 큰 경우는 용량이 4 kW 였다. 실험용기 상부에는 냉각수 상부에 형성될 수 있는 기포를 제거하기 위하여 배기관을 설치하였다. 실험용기 측면에는 실험이 종료된 후 용융상태의 금속과 고화금속을 분리 수거할 수 있도록 공기 주입구와 용융물 배기관을 설치하여 고체상태와 액체상태로 분리 배기한 용융물을 이용 측정 온도분포로부터 계산한 고화층 두께를 고화된 양으로 검증하였다.

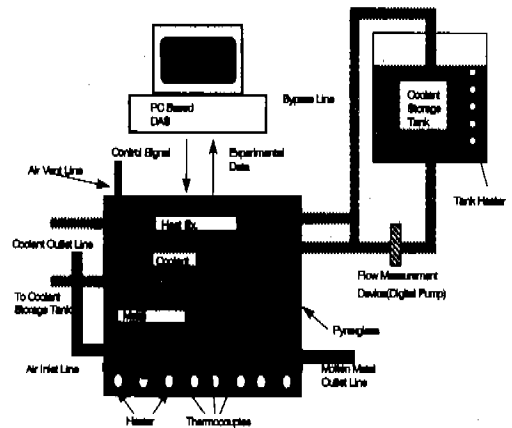


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental facility in the high aspect ratio case.

본 실험의 냉각수 주입장치는 냉각수 저장탱크, 펌프 및 관련 배관으로 구성하였다. 냉각수 저장탱크 내부에는 열전대와 히터를 설치하여 실험용기내 용융물 상부에 일정한 온도의 냉각수가 주입되도록 하여 실험의 초기조건을 만족시킬수 있도록 하였다. 냉각수 공급 배관계통은 저장탱크로부터 냉각수를 실험용기로 직접 주입하는 배관과 열교환기 2차측으로 냉각수를 주입하는 배관으로 구분하여 설치하였다. 실험용기 입구 배관에는 최대 용량 12.4 kg/min을 가진 605 Di/R 디지털 펌프를 설치하고 냉각수 유량을 조절하여 실험용기 상부판이 설정한 온도로 유지될 수 있도록 하였다.

본 실험의 주요 측정인자는 온도와 냉각수 유량이다. 용융물과 냉각수의 온도측정은 오메가사 제품의 T형 열전대를 사용하였으며, 열교환기로 주입되는 냉각수 유량은 펌프 속도를 측정하여 환산하였다. 종횡비가 작은 실험에서는 실험용기 내부의 용융물과 냉각수 온도를 측정하기 위하여 T형 열전대 30 개를 테프론 봉 2 개에 장착하여 실험용기 내부의 중앙과 3/4 지점에 고정하였으며, 하부 가열판 외벽에 2 개, 상부 냉각 구리판 내벽과 외벽에 2 개, 상부 열교환기 입구 및 출구에 2 개, 냉각수 주입배관 입구 및 출구에 2 개, 냉각수 저장탱크에 1 개, 용융물 배기밸브에 1 개 등 총 40 개의 열전대를 설치하여 실험장치 전체 에너지를 보존을 평가하였다. 실험용기 내부에는 용융물과 냉각수 경계에 집중적으로 열전대를 장착하여 용융물의 온도를 측정하여 고화층 두께를 유추할 수 있도록 하였다. 종횡비가 큰 실험의 실험용기에는 1/4, 1/2, 3/4 지점에 각각 열전대를 장착한 테프론 봉을 설치하였으며, 실험장치에 설치한 총 T형 열전대는 종횡비가 작은 경우보다 15 개 많은 55 개를 설치하여 실험용기 내부 온도측정의 정밀도를 높였다.

본 실험장치에서는 실험용기의 상부와 하부의 온도가 일정하게 유지되도록 히터의 출력과 열교환기 2차측 냉각수 유량을 제어장치에서 조절하였다. 실험에서 측정된 자료를 해석하기 위한 실험자료 처리장치의 구성은 주 컴퓨터인 486 IBM PC와 센서(sensor) 및 센서로부터 나오는 신호를 해석하기 위한 하드웨어(hardware)로 구성하였다. 실험은 저온용융 합금물을 용융시켜 실험용기 내로 주입하고 냉각수 저장탱크에서 가열된 냉각수를 용융물 상부로 주입하면서 시작하였다. 이후 실험용기 내에 생성된 기포는 상부의 공기 배기밸브를 이용하여 완전히 제거하고 용융물 하부와 냉각수 상부의 온도를 실험인자로 설정한후 제어기를 이용하여 히터의 출력을 조절하고 열교환기 2

차측으로 주입되는 냉각수 유량을 조절하면서 정상상태 실험을 수행하였다. 본 실험에서 종횡비가 작은 경우는 용융물 하부판의 설정온도가 80 - 100 °C, 냉각수 상부판 설정온도가 25 - 50 °C에 따라, 종횡비가 큰 경우는 75 - 100 °C, 냉각수 상부판 설정온도가 30 - 60 °C에 따라 각각 정상상태 실험을 수행하였으며, 각 지점의 온도는 최대 ± 0.5 °C 범위 내에서 유지되도록 하였다.

### 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 온도 변화

Fig. 4는 종횡비가 작은 경우에 실험용기 상부판의 온도를 30 °C로 고정하였을 때 하부판 온도 변화에 따른 실험용기 내부 온도변화를 보여주고 있다. 그림에서 실선의 하부 7.5 cm는 용융물층이고 상부의 7.5 cm는 냉각수층이며, 용융물 층에서 온도가 70 °C 이하는 고화층이고 70 °C 이상은 액체 영역이다. 그림에서 보는 바와 같이 용융물 내부의 자연대류 영향으로 용융물 하부 온도가 용융물 내부 온도변화에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 실험용기 하부판의 온도가 80 °C인 경우는 용융물의 많은 부분이 고화되어 고화층을 형성하였기 때문에 용융물의 높이에 따른 온도차이가 많이 나타났으나 하부판의 설정온도가 85 °C 부터는 용융물의 자연대류 열전달 영향 때문에 용융물의 높이에 따라 온도차이가 별로 나타나지 않았다. 용융물의 고화층 영역에서의 온도 분포는 거의 선형으로 나타나 순수 전도 열전달이 지배적인 것을 알 수 있다.

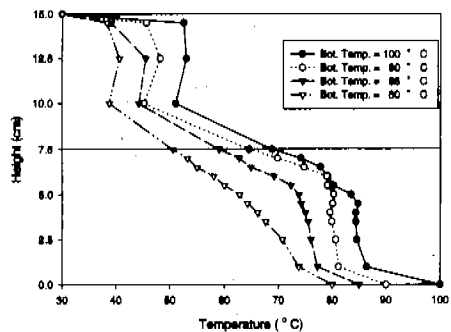
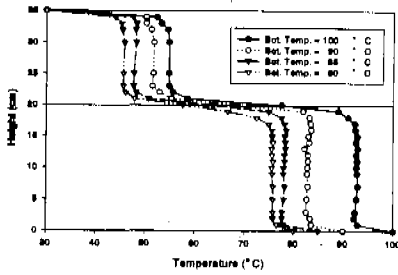


Fig. 4 Experimental data on the central temperature distribution, as a function of the bottom surface temperature in the low aspect ratio case.



distribution, as a function of the bottom surface temperature in the high aspect ratio case.

Fig. 5는 종횡비가 큰 경우에 용융물 상부 냉각판의 온도가 30 °C일때 하부 온도변화에 따른 실험용기내 온도변화를 보여주고 있다. 그림에서 실선의 하부 20 cm는 용융물층이고 상부 15 cm는 냉각수층이다. 종횡비가 큰 경우는 작은 경우보다 Ra 수가 크기 때문에 용융물의 자연대류 열전달이 더 크게 나타나 용융물층의 높이에 따라 온도차이가 별로 나타나지 않는 것으로 나타났다. Fig. 6은 종횡비가 큰 경우에 용융물 하부의 온도가 90 °C일때 상부의 온도변화에 따른 실험용기 내부 온도변화를 보여주고 있다. 실험용기 상부판의 온도변화는 실험용기 하부판의 온도변화보다 용융물 내부 온도변화에 영향을 작게 미치는 것으로 나타났다. 따라서 용융물 내부에서 자연대류 흐름이 발생하기 때문에 용융물 상부의 열수력 조건은 용융물 내부의 온도변화에 많은 영향을 미치지 못하고 용융물 하부의 온도변화가 용융물 내부 온도변화에 많은 영향을 미치는 것을 확인하였다.

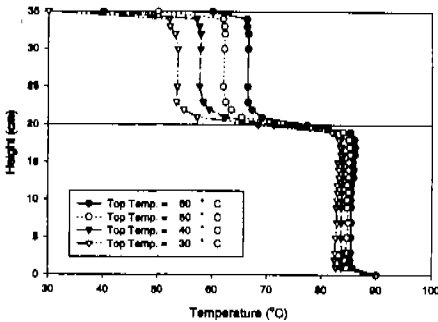


Fig. 6 Experimental data on the central temperature distribution, as a function of the top surface temperature in the high aspect ratio case.

Table 1 Experimental results on natural convection from literature survey.

	Working Fluid	a	b	Ra Range	Pr
Globe & Dropkin <sup>(10)</sup>	Mercury	0.051	1/3	$1.51 \times 10^5 < Ra < 6.76 \times 10^6$	0.022
Rossby <sup>(11)</sup>	Mercury	0.147	0.247	$2.0 \times 10^5 < Ra < 5.0 \times 10^5$	0.024
Threlfall <sup>(12)</sup>	Gas Helium	0.173	0.280	$4.0 \times 10^5 < Ra < 2.0 \times 10^6$	0.8
Heislot et al. <sup>(13)</sup>	Gas Helium	0.096	0.353	$3.0 \times 10^5 < Ra < 4.0 \times 10^7$	0.8
Chu & Goldstein <sup>(14)</sup>	Water	0.183	0.278	$2.8 \times 10^5 < Ra < 1.05 \times 10^6$	6

3.2 용융물내 자연대류 열전달

용융물층내 온도분포에 대한 실험결과에서 나타난 바와 같이 용융물 내부의 자연대류가 고화층형성에 많은 영향을 미치기 때문에 용융물 내부의 자연대류 열전달에 대하여 상세히 분석하였다. 밀폐된 용기 내의 Rayleigh-Benard 자연대류는 지금까지 많은 실험적 연구가 수행되었다.<sup>(10-14)</sup> 이들 대부분의 연구들은 밀폐된 공간에서 상변화는 고려하지 않고 동작유체의 순수 자연대류에 대하여 실험하였으며, 대부분 수행결과는 다음과 같은 상관식으로 발표되었다.

$$Nu = a Ra^b \quad (1)$$

위 상관식에서 a와 b는 각 실험결과에서 정의되는 상수이며, 결과들과 적용조건은 Table 1에 나타나 있다. 그러나 이들 상관식은 동작유체의 고화 과정이 없는 조건에서 개발되어 고화층 두께 증가에 따른 종횡비 변화를 고려할수 없다.

용융물층의 자연대류 열전달양에 대한 본 연구에서의 실험결과를 검증하기 위하여 기존에 발표된 상관식들과 비교,분석하였다. 이때 Ra 수는 용융물의 상,하부 온도차이로 정의되고 Nu 수는 열전달계수와 용융물 층의 액체부분 높이에 따라 정의되며, 이들 무차원수의 정의는 기호설명에 나타나 있다. 본 연구에서는 종횡비 영향을 평가하기 위하여 용융물층의 종횡비가 작은 경우와 큰 경우로 구분하여 비교,분석하였다. Fig. 7은 종횡비가 작은 경우의 Ra 수 증가에 따른 Nu 수 변화에 대한 실험 결과를 기존의 하부가열 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달 상관식들과 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 일반적으로 Ra가 증가함에 따라 Nu 수가 증가하는 것으로 나타났으며, Pr 수가 1보다 작은 금속용융물을 사용한 Globe와 Dropkin<sup>(10)</sup> 및 Rossby 상관식<sup>(11)</sup> 값들이 비금속유체를 사용하여 개발한 상관식 값들보다 다소 낮게 나타난다. 그림에서 보는 바와 같이 Pr 수가 0.017 인 저온용융 금속을 사용한 본 실험결

수가 0.017 인 저용융 금속을 사용한 본 실험 결과는 Pr 수가 0.024 인 수은을 사용한 Globe 와 Dropkin<sup>(10)</sup> 및 Rossby 상관식<sup>(11)</sup> 값들과 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 정밀하게 비교하면 현재의 실험결과가 이들 상관식 값들보다 고화층이 형성된 경우는 약 20%, 고화층이 형성되지 않는 경우는 약 30% 높게 나타나고 있다. 이와 같이 고화층이 형성된 경우가 고화층이 형성되지 않는 경우보다 이들 상관식보다 높은비율이 낮게 나타난 것은 고화층이 전도열저항 역할을 했기 때문이다.

Fig. 8은 종횡비가 큰 경우의 Ra 수 증가에 따른 Nu 수 변화에 대한 실험결과를 기존 상관식들과 비교하여 보여주고 있다. 현재의 실험결과는 종횡비가 작은 경우와 같이 Globe 와 Dropkin<sup>(10)</sup> 및 Rossby 상관식<sup>(11)</sup> 값들과 비슷하게 나타나고 있으며, 정밀하게 비교하면 고화층이 형성된 경우는 약 8%, 고화층이 형성되지 않는 경우는 약 15% 높게 나타나고 있다. 종횡비가 작은 경우인 Fig. 7과 비교하면 종횡비가 큰 경우의 Nu 수가 작은 경우보다 다소 이들 상관식 값들에 더 비슷하게 나타났으며, 종횡비가 작은 경우가 큰 경우보다 Ra 수 증가에 따른 Nu 수가 더 크게 나타나 용융물의 고화층 증가에 따른 종횡비 변화가 용융물의 자연대류 열전달양에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 따라서 용융물의 고화층 형성을 동반하는 자연대류 열전달 현상을 모의할 때는 고화층 두께 증가에 따르는 용융물층의 종횡비 감소효과를 반영한 상관식을 사용해야 한다는 중요한 결과도 출하였다.

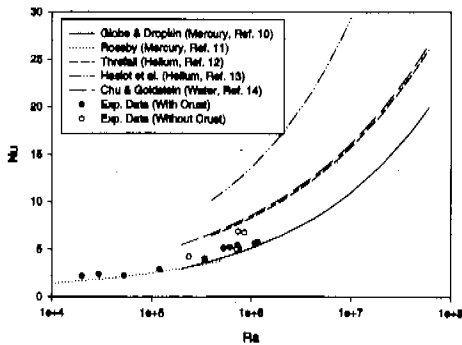


Fig. 7 Comparison of the present experimental data on the natural convection heat transfer rate of the metal pool with & without crust formation in the low aspect ratio case, with other correlations.

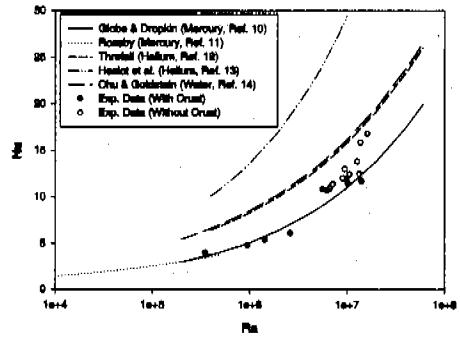


Fig. 8 Comparison of the present experimental data on the natural convection heat transfer rate of the metal pool with & without crust formation in the high aspect ratio case, with other correlations.

### 3.3 고화층이 있는 용융물의 자연대류 상관식 개발

본 실험결과에 따르면 용융물의 고화층이 증가하면 Ra 수가 급격히 감소하고 종횡비도 감소하며 종횡비 변화에 따라 용융물의 자연대류 열전달양도 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 실험결과를 이용하여 고화층 증가에 따른 종횡비를 고려한 용융물의 자연대류 열전달에 대한 새 상관식을 개발하기 위하여 실험결과를 정리 분석하였다. Table 2는 종횡비가 작은 경우에 대한 결과를 보여주고 있다. 용융물층의 종횡비는 정의에 따라 고화층이 두껍게 형성될수록 작게 나타나고 있다. 일반적으로 Ra 수가 증가함에 따라 Nu 수가 증가하는 것으로 나타났으며, 비슷한 Ra 수에서 고화층이 전도 열저항 역할을 하기 때문에 고화층이 형성된 경우가 고화층이 형성되지 않는 경우보다 Nu 수가 낮게 나타났다. Table 3은 종횡비가 큰 경우의 용융물층 열전달량에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 종횡비가 큰 경우는 종횡비가 작은 경우보다 용융물의 높이가 높기 때문에 Ra 수와 Nu 수가 크게 나타난다. 종횡비가 작은 경우와 같이 Ra 수가 증가함에 따라 Nu 수가 증가하는 것으로 나타났으며, 비슷한 Ra 수에서 고화층이 형성된 경우가 고화층이 형성되지 않는 경우보다 Nu 수가 낮게 나타났다.

Ra 수와 Nu 수의 상관관계로부터 고화층 증가가 있는 용융물의 자연대류 열전달에 종횡비를 고려한 새로운 상관식을 도출하였다. 종횡비가 작은 경우와 큰 경우의 고화층이 형성된 모든 경우에 대한 실험결과를 도식하여  $Nu = a (Ra)^b$  상관관계로 정리한 후 상수 a와 b를 결정하였다.

Table 2 Heat transfer rate of the metal pool in the low aspect ratio case.

Bottom Surface Temp. (°C)	Top Surface Temp. (°C)	Heat Flux (W/m <sup>2</sup> )	Ra	t (cm)	AR	Nu
100	50	3.29E4	7.38E5	0.0	0.167	6.8
100	40	3.80E4	8.54E5	0.0	0.167	6.7
100	32	4.29E4	1.13E6	0.02	0.166	5.7
100	30	4.30E4	1.09E6	0.11	0.164	5.6
90	50	2.36E4	7.13E5	0.0	0.167	5.0
90	42.5	2.56E4	7.58E5	0.01	0.167	5.1
90	40	2.63E4	7.31E5	0.18	0.165	5.4
90	30	2.63E4	6.11E5	0.52	0.155	5.2
90	25	2.91E4	5.27E5	0.86	0.148	5.1
80	60	9.64E3	2.38E5	0.0	0.167	4.2
80	57.5	1.04E4	3.42E5	0.25	0.161	4.0
80	50	1.08E4	1.20E5	2.38	0.114	2.9
80	40	1.12E4	5.29E4	3.61	0.086	2.3
80	30	1.43E4	2.95E4	4.30	0.071	2.4
80	25	1.50E4	2.01E4	4.68	0.063	2.2

Table 3 Heat transfer rate of the metal pool in the high aspect ratio case.

Bottom Surface Temp.(°C)	Top Surface Temp.(°C)	Heat Flux (W/m <sup>2</sup> )	Ra	t (cm)	AR	Nu
100	60	1.63E4	9.54E6	0.0	0.8	13.0
100	50	2.28E4	1.27E7	0.0	0.8	13.8
100	40	2.92E4	1.38E7	0.0	0.8	15.8
100	30	3.57E4	1.62E7	0.0	0.8	16.8
90	60	1.34E4	9.09E6	0.0	0.8	12.0
90	50	1.73E4	1.06E7	0.0	0.8	12.4
90	40	2.19E4	1.34E7	0.0	0.8	12.5
90	30	2.23E4	1.41E7	0.12	0.795	11.7
85	60	1.00E4	7.21E6	0.0	0.8	11.4
85	50	1.68E4	1.06E7	0.0	0.8	12.6
85	40	1.77E4	1.01E7	0.43	0.783	11.5
85	30	1.77E4	9.89E6	0.57	0.777	11.9
80	60	8.27E3	6.84E6	0.0	0.8	11.1
80	50	1.05E4	6.62E6	0.55	0.778	10.8
80	40	1.25E4	6.25E6	0.92	0.763	10.7
80	30	1.30E4	5.61E6	1.59	0.736	10.8
75	60	3.13E3	2.62E6	1.66	0.734	6.1
75	50	3.32E3	1.44E6	4.74	0.610	5.4
75	40	3.49E3	9.52E5	7.16	0.514	4.8
75	30	4.08E3	3.52E5	10.78	0.369	4.0

Fig. 9는 개발한 상관식과 실험결과 및 Globe와 Dropkin 상관식과 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이  $Nu = 0.0923 (Ra)^{0.302}$  상관식이 실험결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이때 Ra수의 적용범위는  $2 \times 10^4 < Ra < 2 \times 10^7$ 이다. 따라서 이 상관식은 용융물의 고화과정이 있는 자연대류 열전달에 사용할 수 있으며, 특히 현재 고화층 형성을 고려할 수 없는 Globe와 Dropkin 상관식을 사용하고 있는 원전의 가상 증대사고를 모의하는 MAAP4와 같은 전산코드<sup>(15)</sup> 등에 유용하게

사용될 수 있다.

#### 3.4 고화층 두께에 대한 불확실성 분석

측정한 온도값으로 유추한 고화층 두께의 정확도를 검증하기 위하여 정상상태 실험 종료후 용융 금속물의 액체상태와 고체상태를 분리, 배기하였다. 즉, 종횡비가 큰 경우에 하부 가열판 설정온도가 75 °C, 상부 냉각판 설정온도가 60 °C인 경우에 온도측정으로부터 결정된 고화층 두께를 고화된 용융물 질량으로 계산한 값과 비교하였다.

열전달 해석에 중요하게 사용될수 있다.

참고문헌

- (1) R. Viskanta, 1988, "Heat Transfer During Melting and Solidification of Metals," *J. of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 1205-1218.
- (2) Lia et al., 1993, "Pure Material Melting and Solidification with Liquid Phase Buoyancy and Surface Tension Force," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 2, pp. 411-422.
- (3) H. H. Reinike, 1978, "Turbulent Buoyance Convection Heat Transfer with Internal Heat Sources," *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 2, pp. 305-310, Toronto, Canada.
- (4) H. K. Fauske et al., 1987, "The Three Mile Island Unit 2 Core Relocation - Heat Transfer and Mechanism," *Nuclear Technology*, Vol. 87, pp. 990-1004.
- (5) R. E. Faw et al., 1976, "Postaccident Heat Removal-Part II : Heat Transfer from an Internally Heated Liquid to a Melting Solid," *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 61, pp. 231-238.
- (6) M. Epstein, 1992, "The MACE Internally-Heated Corium Pool : Was It a Thermal Oscillator?," *ANS Proceedings: 92 National Heat Transfer Conference*, San Diego.
- (7) F. B. Cheung et al., 1981, "Periodic Growth and Decay of a Frozen Crust over a Heat Generating Liquid Layer," *J. of Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 369-375.
- (8) A. Bejan et al., 1990, "The Prandtl Number Effect on the Transition in Natural Convection Along a Vertical Surface," *J. of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 787 - 790.
- (9) M. Keyhani et al., 1991, "The Aspect Ratio Effect on Natural Convection in an Enclosure with Protruding Heat Sources," *J. of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 883 - 891.
- (10) S. Globe and D. Dropkin, 1959, "Natural Convection Heat Transfer in Liquid Confined by Two Horizontal Plates and Heated From Below," *J. of Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 24-30.
- (11) H. T. Rossby, 1969, "A Study of Benard Convection with and without rotation," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 36, pp. 309-335.
- (12) D. C. Threlfall, 1975, "Free Convection in Low-Temperature Gaseous Helium," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 67, pp. 17-28.
- (13) F. Heslot, B. Castaing, and A. Libchabre, 1987, "Transitions to Turbulence in Helium Gas," *Phys. Rev.*, A36, pp. 5870-5873.
- (14) T. Y. Chu, and R. J. Goldstein, 1973, "Turbulent Convection in a Horizontal Layer of Water," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 60, pp. 141-160.
- (15) EPRI, 1994, "Modular Accident Analysis Program User's Manual".

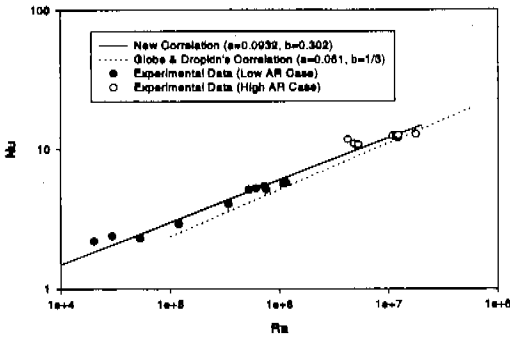


Fig. 9 Comparison of the new correlation with experimental data and Globe and Dropkin's correlation .

이와 같은 경우에 정상상태 실험으로부터 결정된 고화층 두께는 1.66 cm 였다. 정상상태 종료후 고화된 용융물의 양은 6.45 kg 이었으며, 이 값으로 계산된 고화층 두께는 1.83 cm 였다. 이와 같이 실제 고화된 용융물 양으로부터 계산된 고화층 두께가 온도 측정값으로부터 유추한 값보다 약 10 % 가 높은 것은 자연대류 흐름 때문에 고화층이 불균일하게 형성되었으며, 실험수행중 열손실이 있었기 때문이다.

결 론

Pr 수가 1 보다 작은 금속 용융물에서 고화층 두께 증가에 따른 종횡비 변화가 용융물의 자연대류 열전달에 미치는 영향을 분석하기 위하여 초기 종횡비가 각각 다른 두 정상상태 실험을 수행하였다. 실험결과, 용융물 내부의 자연대류 열전달 때문에 용융물 하부 조건이 고화층 형성에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 용융물 고화층의 전도 열저항 역할 때문에 고화층이 형성된 후의 열전달 양은 고화층이 형성되기 전의 열전달양보다 작게 나타났다. 용융물의 자연대류에 관한 실험결과는 기존의 Globe 와 Dropkin 상관식<sup>(10)</sup>과 거의 같게 나타났다으나 고화층 증가에 따른 종횡비 변화가 열전달양에 매우 많은 영향을 미침을 알 수 있었다. 즉, 용융물의 고화층 두께 증가에 따른 Ra 수의 급격한 감소는 Nu 수를 급격하게 감소시켜야 하나 고화층 두께 증가에 따른 종횡비 감소가 Nu 수를 급격하게 감소시키지 않는 것으로 나타난 실험 결과를 이용하여  $Nu = 0.0923(Ra)^{0.302} (2 \times 10^4 < Ra < 2 \times 10^7)$  상관식을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 상관식은 용융물의 고화층 증가에 따른 자연대류