

## 원자력발전소 안전성 평가 향상을 위한 물 자연대류 검증 실험

김동혁\* · 류나영\* · 김만배\*\* · 박창용\* · 김정우†

### Experiment on water turbulent natural convection for safety improvement of nuclear power plant

Donghyuk Kim, Nayoung Ryu, Man-Bae Kim, Chang-Yong Park, Jungwoo Kim

**Abstract** The objective of the present study is to perform experiments for water filled cavity heated and cooled from the side at  $Ra=8.5 \times 10^8$ . This experiment can provide validation database of the standard  $k-\epsilon$  turbulence model for single-phase turbulent natural convection which has been regarded as one of the important phenomena in nuclear safety. For the natural convection inside a cavity, temperature and velocity were obtained by thermometry and PIV (Particle Image Velocimetry) methods. These results would be used for validation of standard  $k-\epsilon$  turbulence model.

**Key Words** : Water(물), Turbulent natural convection(난류 자연대류),  
Standard  $k-\epsilon$  turbulence model(표준  $k-\epsilon$  난류모델)

### 1. 서론

외부의 전원이 차단된 조건에서 원자력 발전소에서의 열원 냉각은 자연대류 (Natural convection) 을 이용한 냉각이 가장 현실적으로 효과적인 방법

으로 인정되고 있다. 신형원자로 개발의 일환으로 피동격납용기냉각계통 및 피동잔열제거계통 등의 피동냉각계통 관련 연구가 다양하게 수행되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 이런 장치들의 정확한 성능 평가를 위해서는 기존 원자력계에서 사용되고 있던 1차원 계통 코드가 아닌, 새롭게 개발되고 있는 다차원 기기 코드의 적용이 필수적이다.<sup>(3)</sup>

현재 한국원자력연구원에서는 CUPID라는 다차원 기기 코드를 개발 중에 있다. CUPID 코드는 원자력 열수력계통의 사고 안전성 해석이나 기기들의 성능을 평가하는 데 목적을 두고 있다. CUPID 코드는 난류유동 모사를 위해 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 기반 표준  $k-\epsilon$  모델을 도입하고 있다.<sup>(4,5,6)</sup>

피동안전계통의 하나인 수조에서의 자연대류 열혼합 현상은 일반적으로 단상 유동에서 시작하

---

† Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology  
E-mail: kimjw@seoultech.ac.kr

\* Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

\*\* Department of Mechanical and Robot Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

---

여 2상유동으로 진행된다. 그러므로 CUPID 코드를 이용하여 피동 안전계통 수조 장치 성능 예측을 위해서는 표준 k-ε 모델이 자연대류 현상을 정확히 예측하는 것이 필요하다.

현재까지 표준 k-ε 모델을 이용한 자연대류 현상에 대한 대부분의 연구는 공기에 대해 이루어져 왔다. 그러나 공기와 물의 물성치가 다르고 작동유체의 물성치가 자연대류의 특성에 영향을 준다는 점을 감안할 때,<sup>(7)</sup> 표준 k-ε 모델이 물에 대한 자연대류 현상을 정확히 예측하는지 확인하기 위해서는 물에 대한 자연대류 검증 실험이 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 자연대류 현상에 대한 표준 k-ε 모델 성능 평가를 위하여 작동유체를 물로 하는 자연대류 실험을 수행하고자 한다.

## 2. 실험장치 구성

본 연구에서는 작동유체가 물인 단상 자연대류 실험을 위하여 고온과 저온인 벽이 좌측과 우측에 위치한 형태의 실험을 고려하였다. 이런 형태는 자연대류 실험을 위하여 많이 고려되는 형태이다.<sup>(8,9,10)</sup> 그러기 위하여 만들어진 실험 장치는 그림 1에서 보여지는 바와 같이 아크릴로 300x300x300 [mm] 크기이며, 스테인리스 스틸로 설계한 water block 2EA를 thermal grease로 옆면에 각각 1EA씩 접착시켰다. 좌측과 우측의 수직벽은 각각 고온 및 저온 유체를 흐르도록 하는 항온조와 펌프에 연결된 water jacket에 접촉되어 고온과 저온의 수직벽을 형성하며 내부공간에서 유체의 온도는 열전대의 온도에 의해 결정된다.

공간 또는 표면온도는 깊이 방향의 정중앙 단면(지면의 수직방향으로 150mm 위치)에 열전대를 활용하여 측정된다. 보다 구체적으로는 윗판 및 밑판에서 각각 10 mm 및 90 mm 떨어진 거리에서 판의 표면온도를 측정하였다. 또한 공간의 온도는 벽면에서 20 mm 위치까지는 5mm 간격으로 열전대를 위치시키고 그 다음은 30mm, 이후에는 20mm 간격으로 90mm 위치까지 열전대를 배치하였다. 이후 표면에서 120, 150 mm 위치에 열전대를 배치

하고 역시 대칭형태로 반대편 공간에도 열전대를 위치시켰다. Labview 프로그램을 이용하여 전압신호를 컴퓨터로 받아들여 온도를 측정하는 시스템을 구축하였다(그림 3 참조).

물의 온도를 측정하는 조건에서 고온측 수직벽면의 온도는 30.15°C, 저온측 수직벽면의 온도는 13.56°C로 측정되었다. 그러나 현재 측정 조건상 벽면 온도를 직접 측정할 수 없는 관계로, 벽면 온도를 도출하기 위하여 측정된 온도를 보정하는 작업을 수행하였다. 그러기 위하여 우선 본 실험 공동 크기와 온도차이에 기반한 Rayleigh수를 정의한 후 자연대류 상관식 ( $N = 0.0082 Ra^{0.329}$ )을 이용하여, 벽면과 작동 유체 사이의 대류 열전달량을 추정하였다. 이 때 작동유체의 평균온도는 21.332°C로 하였다. 이 값이 아크릴 벽면에서의 전도열전달량과 같은 조건이 될 때의 온도를 구하기 위하여 반복계산을 하면 좌측과 우측의 온도는 24.7°C와 17.98°C가 각각 나오게 된다. 이 때 Ra수는  $8.5 \times 10^8$ 이다.

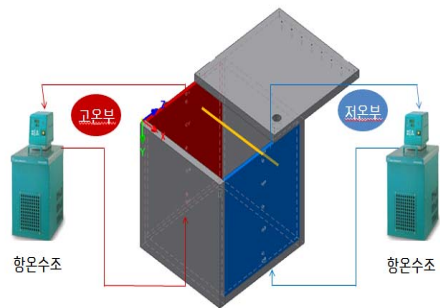


Fig. 1. Schematic of an experiment for water filled cavity heated and cooled from the side

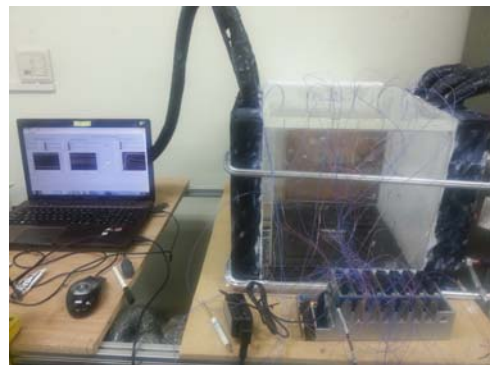
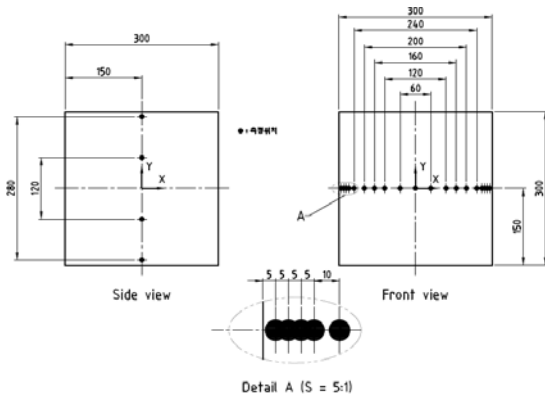
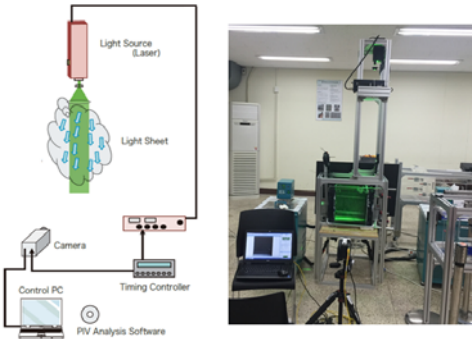


Fig. 2. Experimental setup

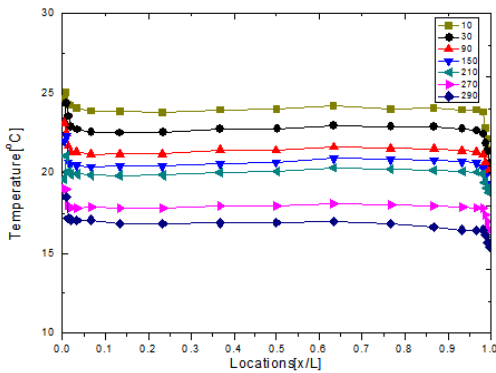


**Fig. 3.** Thermometry setup for temperature measurement

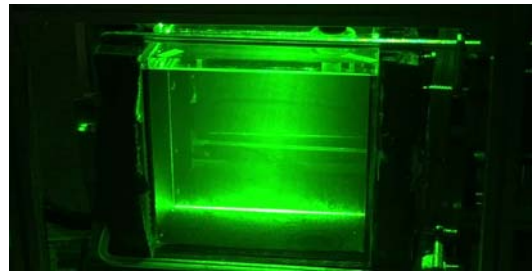
다음으로 본 실험에서는 그림 4에 보이는 것과 같은 PIV 시스템을 이용하여 공동 내부 자연대류 속도도 측정하였다. PIV 실험에 사용된 카메라는 1초당 24 프레임 (24fps)을 촬영할 수 있다. 또한 사용된 입자는  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 이다.



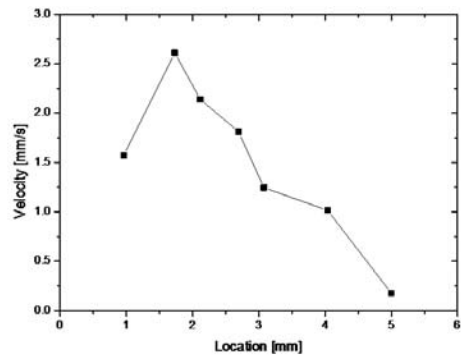
**Fig. 4.** PIV setup for velocity measurement



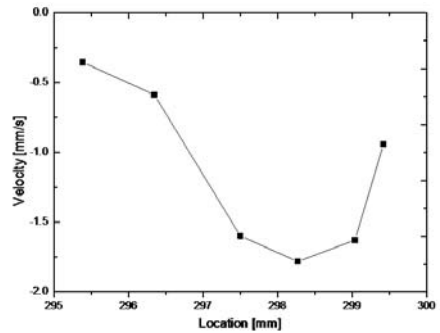
**Fig. 5.** Temperature measurement data along the side direction at several vertical locations.



**Fig. 6.** PIV snapshot

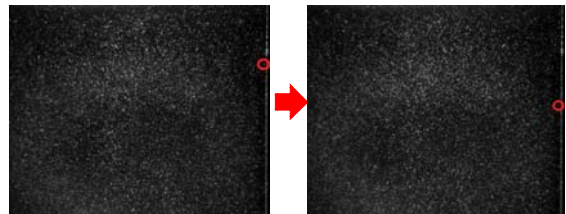


(a)



(b)

**Fig. 7.** Vertical velocity distribution along the x-direction: (a) near the left wall (hot temperature region); (b) near the right wall (cold temperature region).



**Fig. 8.** Tracking of target particle for velocity measurement near the side wall.

### 3. 실험 결과

그림 5는 2절에서 설명된 열전대 방법을 이용하여 공동 내부 온도를 측정된 결과이다. 그림 5에서 좌측과 우측에 대략적으로 약 5mm 정도의 온도경계층이 형성되는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 고려한 Ra수와 유사한 조건에 대한 공기 자연대류 실험결과와 비교하면 온도경계층이 상대적으로 얇은 것을 알 수 있으며,<sup>(10)</sup> 이는 공기와 물의 Pr수의 차이에 기인한 것이다 (공기의 Pr수는 0.7이며, 물의 Pr수는 약 5이다).

그림 6은 공동 내부 자연대류 속도를 측정하기 위하여 수행한 PIV 실험에 대한 순간 사진이다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 위에서 조사되는 레이저로 인해 아래쪽 벽 근처 온도가 약간 상승하는 문제점이 있지만 전체적으로 문헌상에 잘 알려진 바와 같이 왼쪽에서 오른쪽으로 회전하는 큰 보텍스 구조 하나가 공동 내부에 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 7은 실험장치의 경계층으로 추정되는 구간에서 속도를 측정된 결과이다. 현재 본 실험에서 사용한 PIV 코드의 한계로 인해 벽면데이터를 직접 얻기 어려웠던 관계로, 본 실험에서는 카메라로 측정된 이미지를 가지고 경계층 근처에 존재하는 타겟 입자를 설정하고 해당 입자가 시간에 따라 타겟 입자의 이동거리를 비교해 속도를 측정하는 방식을 택하였다(그림 8 참조).

그림 7에서 볼 수 있듯이 고온인 좌측벽에서 유체는 상승하는 속도를 가지며, 저온인 우측벽에서는 하강하는 속도를 가진다. 이는 그림 6에서 설명한 바와 같이 공동 내부에 존재하는 고온에서 저온으로 회전하는 보텍스 구조에 기인한 것이다. 그림 7에서 확인되는 속도 경계층의 두께는 그림 5에서 확인되는 온도 경계층의 두께와 거의 유사하다. 보통 강제대류에서는 물과 같이 Pr수가 1보다 큰 작동유체에 대해서는 속도 경계층의 두께가 온도 경계층의 두께보다 큰 것을 고려할 때, 이는 공동 내 자연대류 특징이라고 보여진다. 또한 그림 7에서 보면, 상승하는 속도가 하강하는 속도보다 약간 크게 나오며 이는 최근 실험결과와 정성적으로 일치하는 것이다.<sup>(9)</sup>

### 4. 결 론

본 논문에서는 작동유체가 물인 단상 난류 자연대류 현상에 대한 실험을 수행하였다. 문헌 조사를 통하여 정육면체 형태 공동의 좌측과 우측을 고온과 저온으로 하는 자연대류 형태를 고려하였다. 표준  $k-\epsilon$  난류모델에 기반을 두고 있는 3차원 기기 해석 코드인 CUPID 코드를 이용하여 수조 내 단상 난류 자연대류 현상을 정확히 예측하기 위한 노력의 일환으로, 공동 내부 자연대류 온도와 속도를 열전대와 PIV 실험으로 측정하였다.

### 후 기

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국 원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 결과입니다.(No. 1305011)

### REFERENCE

- 1) 이현진 외, 2016, "MARS 코드의 수평관내부 응축열전달 모델 평가 및 개선," 에너지공학, 제25권 제1호, pp.56-68.
- 2) Bae et al., 2012, "Design of condensation heat exchanger for the PAFS (Passive Auxillary Feedwater System) of APR+ (Advanced Power Reactor Plus)," Annals of Nuclear Energy, Vol.46, pp.134-143.
- 3) Cho, H. K. et al., 2014, "Simulation of single- and two-phase natural circulation in the passive condensate cooling tank using the CUPID code," Journal of Nuclear Science Technology,
- 4) Yoon et al., 2014, "Recent improvements in the CUPID code for a multi-dimensional two-phase flow analysis of nuclear reactor components," Nuclear Engineering and Technology, 46, pp.655-666.
- 5) Jeong et al., 2010, "Development and preliminary assessment of a three-dimensional thermal hydraulics code, CUPID," Nuclear Engineering and Technology, 42, pp.279-296.

- 6) Park, I. K. and Chun K. H., 2013, "Verification of turbulence and non-drag interfacial force models of a computational multi-field dynamics code," *Journal of Computational Fluids Engineering*, 18, pp.99-108.
- 7) 이승준 외, 2015, "코드의 유체 물성치 변화를 고려한 자연대류 해석," *한국전산유체공학회지*, 제20권 제4호, pp.14-20.
- 8) Kowalewski, T. A., 1998, "Experimental validation of numerical codes in thermally driven flows," *Adv. In Computational Heat Transfer*, Begel House Inc., New York, pp.1-15.
- 9) Michalek, T., 2005, "High Rayleigh number natural convection in a cubic enclosure," *EUROTHERM* 82.
- 10) Ampofo, F. and Karayiannis, T. G., 2003, "Experimental benchmark data for turbulent natural convection in an air filled square cavity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, pp.3551-3572.