

단상 난류 자연대류 해석을 위한 난류 모델링 정확도 검증

송익준^a, 신경진^a, 김정우^{a*}, 박익규^b, 이승준^bValidation of Turbulence Models for Analysis of
a Single-Phase Turbulent Natural ConvectionIk-Joon Song^a, Kyung-Jin Shin^a, Jungwoo Kim^{a*}, Ik Kyu Park^b, Seung-Jun Lee^b^a Department of Mechanical Engineering, The Graduate School, Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea^b Korea Atomic Energy Research Institute
111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 December 2015
Revised 11 December 2015
Accepted 14 December 2015

Keywords:

 $k-\epsilon$ turbulence model
turbulent natural convection
nuclear safety
two- and three-dimensional cavities

ABSTRACT

The objective of this study is to validate the performance of the current $k-\epsilon$ turbulence model for a single-phase turbulent natural convection, which has been considered an important phenomenon in nuclear safety. As a result, the natural convection problems in the 2D and 3D cavities previously studied are calculated by using the ANSYS Fluent software. The present results show that the current $k-\epsilon$ turbulent model accounting for the buoyancy effect is in good agreement with the previous results for the natural convection problems in the 2D and 3D cavities although some improvements should be required to get better prediction.

1. 서론

일본 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이후로, 전력 공급이 차단된 상황에서 원자로를 냉각시킬 수 있는 피동안전계통(passive safety system)에 대한 연구는 원자력 열수력 분야에서 많은 관심을 받고 있다. 피동안전계통의 하나인 수조(pool)에서의 자연대류 열혼합 현상은 일반적으로 단상(single-phase) 유동에서 시작하여 2상 유동으로 진행된다.

일반적으로 수조에서의 자연대류 열혼합 현상은 전통적인 원자로 열수력안전해석 프로그램인 RELAP5, TRACE, MARS, CATHARE 등과 같은 1차원 열수력 프로그램으로 해석이 어려

운 다차원 현상이다. 그런 이유로 현재 원자력 열수력 분야에서는 다차원 해석을 해석할 수 있는 코드를 개발하고자 노력중이며, 우리나라에서도 한국원자력연구원에서 CUPID 코드를 개발하고 있다^[1-3].

본 논문에서는 3차원 기기해석 코드인 CUPID 코드를 이용하여 수조 내 단상 난류 자연대류 현상을 정확히 예측하기 위한 노력의 일환으로, 단상 난류 자연대류 현상을 해석할 수 있는 난류모델링 성능을 상용 코드인 ANSYS Fluent를 이용하여 점검하고자 한다. 본 논문에서 다루고자 하는 자연대류 현상은 일반적으로 많이 고려되는 강제대류 현상과 달리, 구동력이 작은 관계로 계산 시 보다 면밀한 검토가 필요하다고 하겠다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6856

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: kimjw@seoultech.ac.kr (Jungwoo Kim).

2. 본 론

2.1 수치해석

본 연구에서는 단상 난류 자연대류 문제를 난류 모델링으로 계산하였다. 본 연구에서 고려하는 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서, x_i 는 좌표계 방향이며, u_i 는 각 방향 속도 성분이다. 또한, p 는 압력이다. $\tilde{\cdot}$ 는 Reynolds 평균된 값들을 의미하며, τ_{ij} 는 난류 응력항이다. 본 논문에서는 난류응력항 τ_{ij} 를 모델링하는데, 많이 고려되는 $k-\epsilon$ 방법을 고려하였다.

단상 난류 자연대류 검증을 위해서, 기존 문헌 조사를 통하여 Table 1과 같이 검증대상을 선정하였다. Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 차원, 종횡비, Ra수에 따라 다양한 검증을 할 수 있도록 대상을 선정하였다.

시간에 대한 차분 방법은 1차 정확도의 implicit Euler 방법을 적용하였다. 공간적으로는 1차 정확도의 상류도식법을 선택하였다. 또한, 본 연구에서는 자연대류를 고려하기 위하여 유동장과 함께 온도장도 계산하였다. 온도장을 계산하기 위한 시간 차분 방법은 유동장의 경우와 같게 하였다.

Table 1에서 볼 수 있듯이, 본 연구에서는 공기를 매질로 고려하였다. 자연대류에서는 온도에 따른 물성치 변화가 중요하므로 본 연구에서는 온도에 따른 물성치 변화를 표 형태로 주는 방식을 추가로 채택하였다. 또한 그 결과를 Boussinesq 방식과 서로 상호비교하였다.

본 연구에서는 부력 영향을 고려한 $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 난류 자연대류 현상을 해석하고자 한다. 따라서, 일반적인 k, ϵ 방정식에 부력 영향을 고려할 수 있는 항 ($G_b = \beta g_i (\mu_t / Pr_t) (\partial T / \partial x_i)$)이 추가되게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (3)$$

Table 1 Validation cases of turbulent natural convection

Working fluids	Dimension	Aspect ratio	Ra	Reference
Air	2	1:1	104	Barakos et al. ^[5] [Num]
Air	3	1:5	~1,010	Lau et al. ^[6] [Num] Cheeswright et al. ^[7] [Exp]

*Num and Exp denotes numerical and experimental studies, respectively.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \\ &+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $G_k (= -\overline{\rho u_i' u_j'} (\partial u_j / \partial x_i))$ 는 평균 속도 구배로 인한 난류 운동에너지의 생성항이다. 또한, $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 와 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 는 모델링 상수이다. 본 연구에서는 $k-\epsilon$ 모델 해석을 위하여 ANSYS Fluent를 이용하였다^[4]. Fig. 1은 본 연구에서 고려한 2차원 사각 공동 또는 3차원 사각 공동에 대한 계산 영역을 간략히 보여주고 있다.

2.2 수치결과

Table 1에서 제시된 검증 대상 중 2차원 사각공동 내 자연대류 현상을 우선적으로 고려하였다. 이 문제는 지금까지 많은 문헌을 통해 검증 또는 기초 연구를 위해 고려된 경우이다. Table 2에 Barakos et al.^[5] 검증을 위한 계산 조건을 간략히 제시되었다.

Fig. 2는 Ra=1010에서의 2차원 온도장과 속도장을 보여준다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 현재 Fluent을 이용한 $k-\epsilon$ 해석 결과는

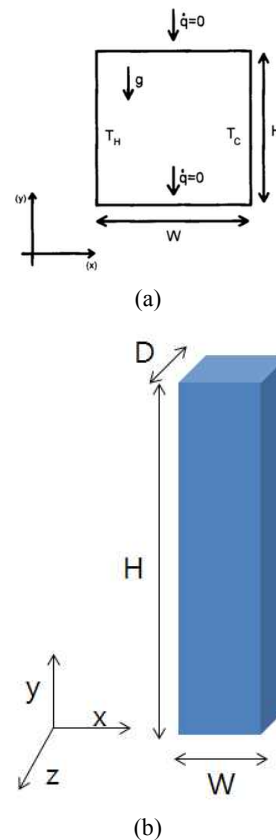
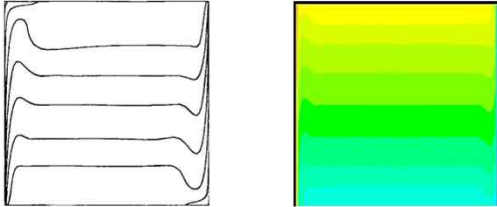


Fig. 1 Computational domain considered in the present study: (a) two-dimensional case, (b) three-dimensional case

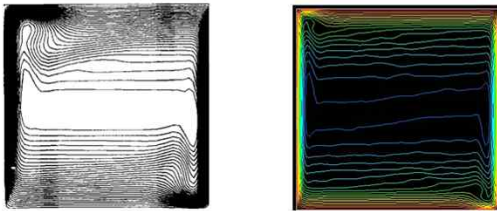
Table 2 Numerical aspects of Barakos et al.^[5]

T_H (°C)	T_C (°C)	H/W	W	Ra	Number of grid points
30	10	1	1.68	10^{10}	80×80

• Temperature



• Streamlines



Barakos et al. (1994)

Fluent (Present)

Fig. 2 Contours of temperature and streamline at $Ra=10^{10}$ in the case of Barakos et al.^[5]

Barakos et al.^[5]의 기존 결과와 전반적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 구체적인 방법론상으로 Fluent와 Barakos et al.에서 고려한 $k-\epsilon$ 모델은 거의 유사하며, 다만 벽법칙에서만 약간의 차이를 보인다. 그런 이유로 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 벽 근처에서 현재 계산 결과와 Barakos et al. 결과가 약간의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다.

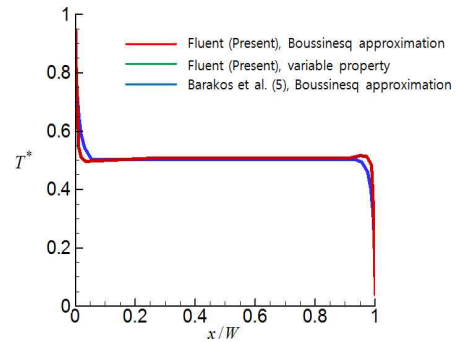
자연대류를 고려할 때, 또 하나 고려해야 할 부분은 물성치에 대한 부분이다. ANSYS Fluent와 같은 상용 코드에서는 Boussinesq approximation이 많이 이용되고 있으나, 원자력계 분야 코드에서는 물성치 테이블을 이용하여 물성치를 다루고 있다. 이런 방법론상의 차이를 확인하기 위하여, Boussinesq approximation 외에 Table 2와 같이 온도에 따른 물성치 변화를 piecewise linear 방식을 처리하는 방식을 추가로 고려하였다. Boussinesq approximation 고려 시에는 20°C를 기준 온도로 하였다.

Fig. 3은 $Ra=10^{10}$ 일 때, 온도 분포와 각 방향 속도 분포를 보여 준다. 여기서 속도는 $\sqrt{g\beta\Delta TH}$ 로 무차원 되었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, Fluent 내 $k-\epsilon$ 난류 모델링은 기존 논문과 비교하여 온도 경계층을 얇게 예측하며, 그로 인하여 벽 근처 속도가 작게 나올 수 있다. 또한 물성치 처리에 대한 영향은 작은 것으로 평가되었다.

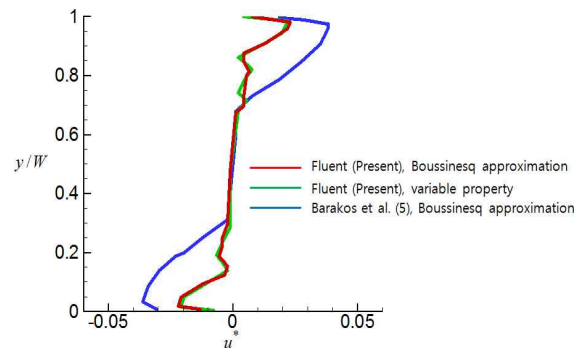
다음으로 Fig. 1(b)에 제시된 3차원 사각공동 내 자연대류 현상

Table 3 Variation of properties of air

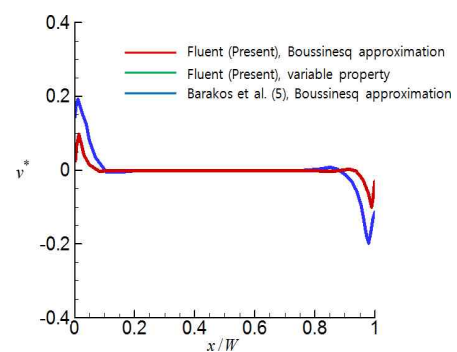
	10°C	20°C	30°C
C_p (J/kgK)	1,007	1,007.1	1,007.4
μ (kg/m^3)	1.7792×10^{-5}	1.8308×10^{-5}	1.8815×10^{-5}
k (W/mK)	0.024871	0.025623	0.026361
β (1/K)	0.0035311	0.0034106	0.0032982
ρ (kg/m^3)	1.247829	1.205113	1.165232



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Distributions of (a) Temperature ($T^*=(T-T_C)/(T_H-T_C)$) (at $y=0.5$ W); (b) x-directional velocity (at $x=0.5$ W); (c) y-directional velocity (at $y=0.5$ W) at $Ra=10^{10}$ in the case of Barakos et al.^[5]

에 대한 검증하였다. 3차원 사각 공동 내 자연대류 현상은 앞에서 고려한 2차원 사각공동 내 자연대류 문제와 비교하여 상대적으로 연구가 잘 안 된 부분이다. 2차원과 3차원 자연대류에 대한 비교는

Table 4. Numerical aspects of Lau et al.^[6]

T_H (°C)	T_C (°C)	W (m)	H (m)	D (m)	Ra	Number of grid points
77.2	31.4	0.5	2.5	0.25	4.56×10^{10}	$75(x) \times 168(y) \times 78(z)$

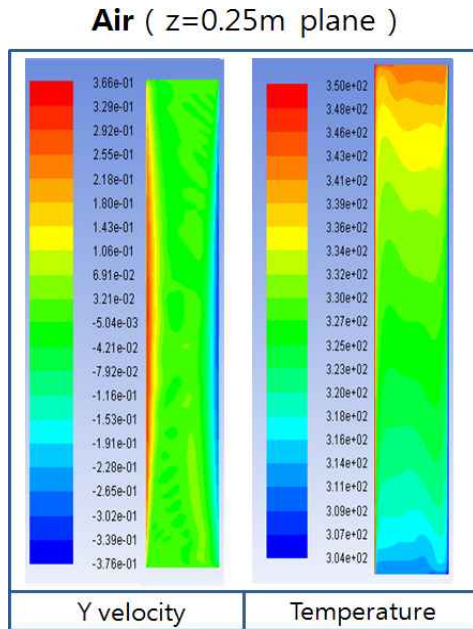


Fig. 4 Contours of y-directional velocity and temperature at $z=0.25$ in the case of Lau et al.^[6]

Trias et al.^[8]에서 다루어진 바 있다.

본 논문에서는 Table 1에 제시된 바와 같이, Lau et al.^[6] 논문 내용을 검증하고자 하였다. 본 계산은 Lau et al. 논문과 같이 Boussinesq approximation 기반으로 이루어졌다. Table 4에 Lau et al. 검증을 위한 계산 조건을 간략히 제시되었다. Fig. 4는 깊이 방향으로 가운데 지점인 $z=0.25$ m 평면에서 수직방향 속도와 온도 분포에 대한 2차원 선도를 보여준다. 2차원과 3차원의 차이에도 불구하고, Ra수가 유사한 관계로 Fig. 2와 정성적으로 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 5는 $y=0.5$ m, $z=0.25$ m에서 x방향에 따른 온도와 y-방향 속도를 각각 보여준다. 계산 정확도를 확인하기 위하여 Lau et al.^[6]이 참고한 실험 결과(Cheesewright et al.^[7]) 및 Lau et al. 계산 결과를 같이 그렸다. Lau et al.에서는 DVME과 같은 LES (큰에디모사) 기법에 기반한 방법들을 이용하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이, 현재 Fluent 내 $k-\epsilon$ 난류모델링은 3차원 현상을 정량적으로 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 또한, 온도 분포는 실험 결과와 비교하여 본 계산 결과를 포함한 모든 수치해석결과가 약간 높게 예측하는 문제점을 보이고 있으며, 이는 향후 보완해야 할 점으로 생각된다.

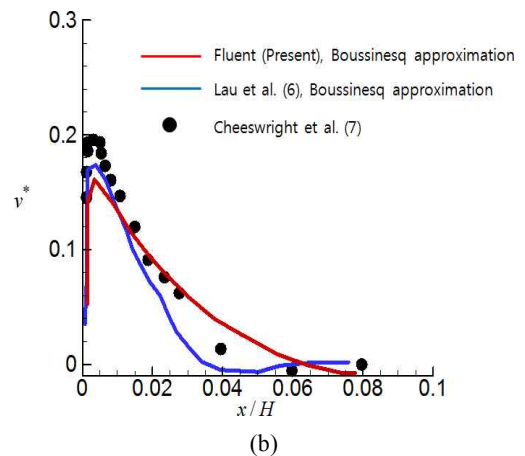
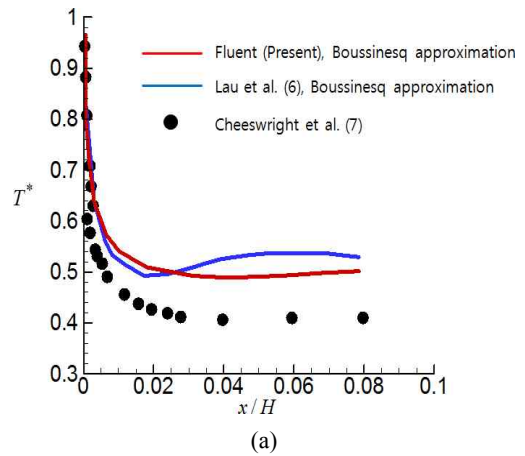


Fig. 5 Distributions of (a) Temperature ($T^*=(T-T_C)/(T_H-T_C)$); (b) y-directional velocity at $y=0.5$ m, $z=0.25$ m in the case of Lau et al.^[6]

3. 결론

본 논문에서는 3차원 기기해석 코드인 CUPID 코드를 이용하여 수조 내 단상 난류 자연대류 현상을 정확히 예측하기 위한 노력의 일환으로, 단상 난류 자연대류 현상을 해석할 수 있는 난류모델링 성능을 상용 코드인 ANSYS Fluent를 이용하여 점검하고자 하였다.

단상 난류 자연대류 검증을 위해서, 기존 문헌 조사를 통하여 차원, 종횡비, Ra수에 따라 다양한 검증을 할 수 있도록 대상을 선정하였다. 2차원 및 3차원 사각공동 내 자연대류에 대한 검증 계산 결과, 현재 ANSYS Fluent 내 자연대류 효과를 고려하는 $k-\epsilon$ 난류 모델링은 몇 가지 보완사항이 있어야 하지만, 전반적으로는 좋은 예측 성능을 보이고 있음을 확인하였다.

이런 결과를 바탕으로 현재 한국원자력연구원에서 개발하고 있는 자연대류 현상에 대한 CUPID 코드 예측 성능 향상에 기여하고자 한다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Yoon, H. Y., Lee, J. R., Kim, H., Park, I. K., Song, C.-H., Cho, H. K., Jeong, J. J., 2014, Recent Improvements in the CUPID Code for a Multi-dimensional Two-phase Flow Analysis of Nuclear Reactor Components, *Nucl. Eng. and Tech.*, 46:5 655-666.
- [2] Jeong, J. J., Yoon, H. Y., Park, I. K., Cho, H. K., Lee, H. D. 2010, Development and Preliminary Assessment of a Three-dimensional Thermal Hydraulics Code, CUPID, *Nucl. Eng. and Tech.*, 42:3 279-296.
- [3] Yoon, H. Y., Park, I. K., Lee, Y. J., Jeong, J. J., 2009, An Unstructured SMAC Algorithm for Thermal Non-equilibrium Two-phase Flows, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 36:1 16-24.
- [4] ANSYS, 2013, ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc.
- [5] Barakos, G., Mitsoulis, E., Assimacopoulos, D., 1994, Natural Convection Flow in a Square Cavity Revisited: Laminar and Turbulent Models with Wall Functions, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 18:7 695-710.
- [6] Lau, G. E., Yeoh, G. H., Timchenko, V., Reizes, J. A., 2012, Application of Dynamic Global Coefficient Subgrid-scale Models to Turbulent Natural Convection in an Enclosed Tall Cavity, *Phys. Fluids*, 24 094105.
- [7] Cheesewright, R., King, K. J., Ziai, S., 1986, Experimental Data for the Validation of Computer Codes for the Prediction of Two-dimensional Buoyant Cavity Flows, *ASME HTD-60*, 75-81.
- [8] Trias, F. X., Soria, M., Oliva, A., Perez-Segarra, C. D., 2007, Direct Numerical Simulations of Two- and Three-dimensional Turbulent Natural Convection Flows in a Differentially Heated Cavity of Aspect Ratio 4, *J. Fluid Mech.*, 586 259-293.