

과열비에 따른 유체밀도 변화를 고려한 복사유체 유동 해석

한 조 영^{*1}, 채 종 원^{*1}, 박 응 식^{*1}, 남 문 경^{*2}

Flow Analysis for Radiating Fluid with Density Variation affected by Overheat Ratio

C. Y. Han, J. W. Chae, E. S. Park and M. G. Nam

A numerical investigation has been performed to discuss the radiation-affected steady-laminar natural convection in an enclosure under a large temperature difference. Due to inherent nature of this study, the Boussinesq approximation is no longer valid. Therefore the radiating fluid in an enclosure is treated as a ideal gas. To examine the effects of thermal radiation on thermo-fluid dynamic behaviors in complex geometries, two incomplete partitions are introduced. Based on the results of this study, the dispositions of incomplete partitions with radiatively participating medium are found to incur a distinct difference in fluid-dynamic as well as thermal behavior.

Key Words: Boussinesq 근사(Boussinesq Approximation), 밀도변화(Density Variation), 복사유체(Radiating Fluid), 과열비(Overheat Ratio), 밀폐공간(Enclosure)

1. 서 론

밀폐공간 내부에서 발생하는 자연대류 유동은 다양한 공학적 시스템에서의 열 및 물질전달 현상을 지배하는 매우 중요한 공학적 현상이다. 일반적으로 온도차가 그리 크지 않은 밀폐공간내 유동을 수치해석하기 위해서는 Boussinesq 근사가 이용된다. 그러나 큰 온도차가 존재하는 밀폐공간의 경우에는 Boussinesq 근사가 더 이상 타당하지 않으며, 대신 온도에 따른 유체의 밀도 변화를 고려해야만 한다. 더욱이 큰 온도차로 인한 복사유체의 복사 효과도 함께 추정되어야 한다.

분할벽(partition)이나 장애물(obstruction)이 존재하지 않는 단순 밀폐공간(simple enclosure)의 경우, 과거 수십년간 많은 연구들[1, 2]이 진행되어져 왔다. 그러나 인간이 주거하는 실제 건물의 실내나 하류부

분에 과열기가 존재하는 보일러 연소기, 항공기 엔진 주위의 구조물, 컴퓨터 내부의 기판들, 태양열 집열기 등의 실제적인 공학적 시스템을 그와 같은 단순 밀폐공간으로 모사하기에는 무리가 있다. 그러므로 보다 실제에 가까운 해석모델을 선정하기 위해서 분할벽과 장애물을 포함하는 복합 밀폐공간(complex enclosure)을 고려해야 할 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 우선 단순 밀폐공간에서 과열비에 따른 유체 밀도변화의 영향을 수치모사를 통해 해석하여, Boussinesq 근사의 적용 범위를 검증한다. 이후 고온의 온도차가 존재하는 복사 유체로 충만한 복합 밀폐공간에서 단일 분할벽을 매우 얇은 단일 격벽(adiabatic baffle)으로 가정한 후, 서로 떨어져 존재하는 불완전 분할벽들(incomplete partitions)을 도입함으로써 고려하고자 하는 수치적 모델을 실제 공학적 시스템과 좀 더 유사하게 모사한다. 그리고 복사해석기법으로는 유한체적복사해법(finite volume method, FVM)을 도입해 유동해석용 격자를 공유함으로써, 수치계산 영역내에 존재하는 단일격벽을 불투명 복사차폐물로 가정한다. 최종적으로 자연대류와

*1 정희원, 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단

*2 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단

*E-mail : cyhan@kari.re.kr

복사간의 상호작용에 대한 수치 해석을 과열비에 따른 유체의 밀도 변화를 고려하여 수행함으로써, 복합 밀폐공간에 충만한 복사유체의 유동 및 열전달 특성을 고찰하고자 한다.

2. 이론모델의 해석

2.1 해석 모델

본 연구에 고려할 기하학적 형상은 가로 및 세로 길이가 각각 H인 정방형 밀폐공간이다. 이 밀폐공간 내에 길이가 0.6H인 격벽이 $x=0.3H$ 와 $0.7H$ 의 두 위치에 존재한다. 격벽의 배치에 따른 영향을 알아보기 위해 격벽의 위치를 상부와 하부로 배치한다. 좌측 수직벽면은 T_H 의 고온이고 우측 수직벽면은 T_C 의 저온으로 일정하게 유지된다. 그리고 상하부 벽면과 격벽표면은 모두 단열되어 있으며 내부 기체는 복사 고려시 회색기체(gray gas)로 가정한다.

2.2 무차원 지배방정식

정상상태의 층류 자연대류 유동을 고려했으며 내부 유체는 Newtonian 유체로 가정한다. 모든 물리적 변수들의 무차원화는 적절한 무차원변수 및 무차원수를 도입하여 수행된다. 무차원화된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\rho_o u_o^2}{p_o} \frac{p}{T} + \frac{1}{T} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\tau_o} \frac{dI}{ds} = \frac{(1-w_o)}{\pi} T^4 - I \quad (4)$$

(1)식은 연속방정식이며, (2)식은 일반화된 운동량 및 에너지 보존 방정식이다. 운동량 보존 방정식의 생성항에는 $-\nabla p - \frac{1}{Fr^2} (\rho - 1) \hat{j}$ 항이 운동량 소산 항과 함께 나타나며, $Fr = \frac{u_o}{\sqrt{gH}}$ 이다. 하첨자 o는

참조값(reference value)을 나타낸다. 한편 에너지 방정식의 경우 에너지 소산항과 함께 다음 (5)식의 복사생성항이 추가된다.

$$-\frac{\tau_o}{Re \cdot Pr \cdot Pl} (1-w_o) \frac{1}{C_p} \left(T^4 - \frac{1}{4} \int_{4\pi} Id\Omega \right) \quad (5)$$

위 식에서 $Pl = \frac{k_o/H}{4\sigma T_o^3}$ 이다. (3)식은 무차원화된

이상기체 상태방정식이며, 고온의 온도차가 존재하여 Boussinesq 근사의 적용이 불가능한 경우 내부 매질의 밀도 변화를 고려하기 위해 도입한다. 식(4)는 무차원 복사전달방정식(RTE)을 나타낸다.

2.3 경계조건

복사에 대해 확산적으로 방사 및 반사하는 불투명 등은벽면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$u = v = 0, T = 1 + \delta/2 \text{ at hot wall} \quad (6)$$

$$u = v = 0, T = 1 - \delta/2 \text{ at cold wall} \quad (7)$$

$$I_w = \frac{\epsilon_w T_w^4}{\pi} + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} H \quad (8)$$

(6) 및 (7)식에서 온도의 경계 조건으로 부여된 무차원 변수 $\delta = (T_H - T_C) / T_o$ 는 과열비(overheat ratio)로 본 연구의 중요한 매개변수이다. 참조온도는 두 등온 벽면의 평균온도, 즉 $T_o = (T_H + T_C) / 2$ 를 취한다. 한편 (8)식에서 ϵ_w 는 벽면방사율이고, H는 벽면으로의 무차원 입사복사열유속(irradiation)을 의미한다. 단열벽면 및 단열격벽 표면에서의 열적 경계조건은 다음의 에너지 평형식으로부터 구할 수 있다.

$$\vec{q}^T \cdot \hat{n}_w = -k \nabla T \cdot \hat{n}_w + \frac{\epsilon_w}{4Pl} (T_w^4 - H_w) = 0 \quad (9)$$

3. 수치해석

유동장의 수치해석은 엇물림격자(staggered grid)를 사용해 Karki[3]의 압축성 SIMPLER 알고리즘에 입각해 수행되었다. 대류항은 고차 풍향차분법인

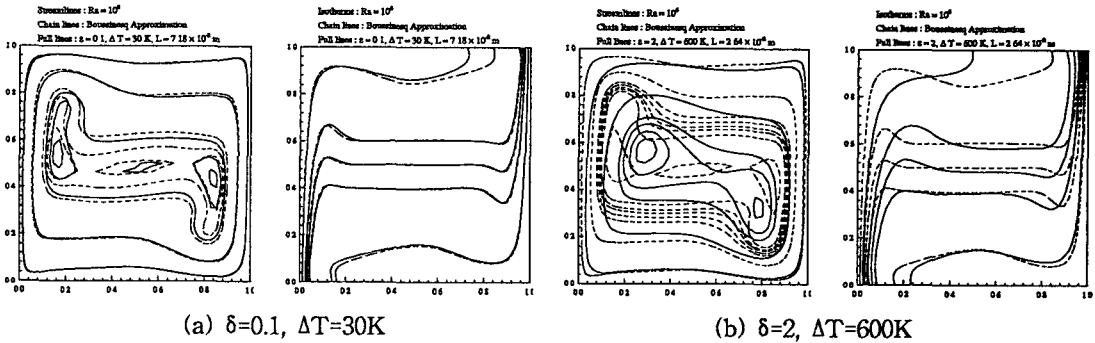


Fig.1 Effect of density variation on streamlines as well as isotherms

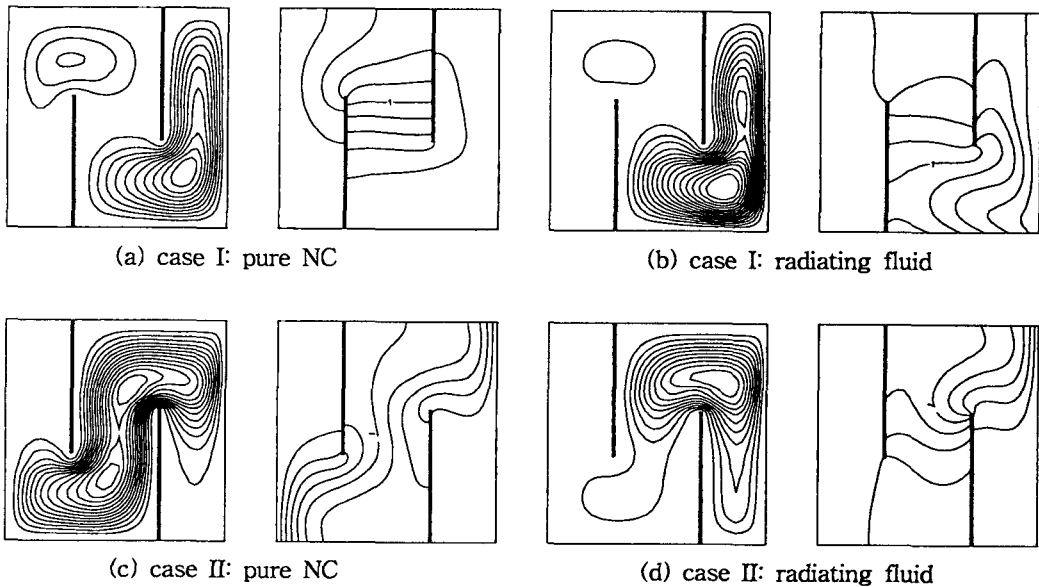


Fig.2 Effects of thermal radiation on thermo-fluid dynamic behaviors in complex enclosures

QUICK scheme[4]을 사용했으며 확산항들에는 종속 변수의 선형적 분포를 가정했다. 에너지 방정식의 복사생성항을 계산하기 위해서 수치적으로 Chai 등[5]이 제안한 선형화된 복사전달방정식을 사용했다. 전체 계산영역은 여러단계의 검증을 거쳐 공간적으로는 62x62개의 비균일 격자계를 채택했고, 전체 입체각 4π는 2x24개의 균일 제어각(control angle)으로 등분했다.

4. 결과 및 검토

4.1 과열비에 따른 유체 밀도변화의 영향

과열비에 따른 유체 밀도변화의 영향을 고찰하기 위해, Ra=10⁶으로 고정 후 ΔT=30K 및 600K일 경우의 두 경우에 대해 Boussinesq 근사를 차용한 계산 결과와 내부 유체를 이상 기체로 가정하여 유체의 밀도 변화를 이상기체 상태방정식으로부터 추산한 결과를 Fig. 1에 도시했다. 각 경우에 대해 과열비는

각각 0.1과 2이다. Fig. 1(a)에서 알 수 있듯 과열비가 작은 경우에는 Boussinesq 근사를 이용한 계산 결과(점선)가 유체의 밀도변화를 고려한 계산 결과(실선)와 크게 다르지 않다. 이는 Boussinesq 근사의 기본 개념과도 일치하는 결과이다. 그러나 Fig. 1(b)와 같이 과열비가 상당히 큰 경우에는 두 방법의 계산 결과가 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 그러므로 매우 큰 온도차가 존재하는 경우에는 더 이상 Boussinesq 근사를 사용할 수 없으며 온도에 따른 유체의 밀도 변화를 고려해야만 한다.

4.2 복합밀폐공간내 복사유체의 거동

과열비 δ 는 1의 경우를 고려했으며 이 경우 각 등온벽면의 실제온도는 저온벽면의 경우 상온인 300K (T_C)이고 고온벽면의 경우 900K(T_H)이다. 격벽의 배치에 따른 영향을 알아보기 위해 격벽을 좌측상부와 우측상부에 배치한 경우(case I) 및 좌측상부와 우측하부에 배치한 경우(case II)의 두 가지를 기본모델로 설정했으며 Gr수는 10^5 으로 고정해 일정한 부력효과를 가정하고 Planck수는 $Pl=0.05$ 로 고정했다.

Case I과 case II의 격막배치에서 순수자연대류의 경우와 내부매질의 복사효과를 고려하는 경우에 대한 유선 및 등온선의 분포가 Fig. 2에 도시되어 있다. 이때 매질의 광학두께 τ_0 는 1로 가정했다. 먼저 Fig. 2(a)와 (c)의 순수 자연대류의 경우를 비교해보면 격벽의 배치에 따라 case I의 경우는 불완전 격벽 사이의 공간에 유체가 갇혀서(fluid trapping) 등온선의 경우 전형적인 성층화 현상을 나타내며 유동은 격벽 양쪽으로 분리되어 존재함을 볼 수 있다. 그러나 case II의 경우는 유동이 격벽 사이에 제한되어(strangled flow) 거의 대칭적인 형태의 유동과 유선을 나타내고 있다. Fig. 2(b)와 (d)에서 볼 수 있듯, 복사가 존재하는 경우 격벽의 존재로 인한 영향은 상당하다. 그 기본적 이유는 단열벽면에 의한 복사차폐효과 때문이다. 복사효과가 고려되는 경우 격벽은 좌측 고온영역과 우측 저온영역을 뚜렷하게 구분하는 역할을 한다. 이 같은 현상은 격벽의 배치와는 무관하게 case I과 case II 모두 동일하게 나타난다. 또한 우측 저온영역에 매질의 온도구배가 심해짐으로써 그 쪽의 유동강도는 증가하고 있다. 단 case I의 경우 유동의 기본적 구조는 복사의 영향을 별로 받고 있지 않지만, case II의 경우는 유동구조에 대한 복사영향이 나타나 우측 상부로 유동의 중심점이 이

동하고 있다. 내부매질의 복사효과가 고려되는 경우 내부매질의 온도는 전반적으로 균일(equalize)해지려는 경향을 보이며 등온선 분포에서 알 수 있듯 전체 매질의 평균온도는 증가하고 있다.

5. 결 론

온도차가 그리 크지 않은 밀폐공간내 유동을 해석하기 위해서는 일반적으로 Boussinesq 근사를 이용한다. 그러나 큰 온도차가 존재하는 경우에는 Boussinesq 근사의 타당성을 유지할 수 없음을 본 연구의 수치 계산을 통해 검증했다. 그러므로 큰 온도차가 존재하는 밀폐공간내 복사유체의 유동 해석 시에는 Boussinesq 근사 대신에 온도에 따른 밀도변화를 고려해야만 한다. 한편 격벽이 있는 복합 밀폐공간내 복사유체의 거동은 격벽이 없는 단순 밀폐공간의 경우에 비해 유체역학적 및 열적으로 뚜렷한 차이를 보임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Fusegi, T. and Farouk, B., 1989, "Laminar and Turbulent Natural Convection-Radiation Interactions in a Square Enclosure Filled with a Nongray Gas," *Numer. Heat Transfer, Part A*, Vol.15, pp.303.
- [2] Han, C.Y. and Baek, S.W., 1999, "Natural Convection Phenomena Affected by Radiation in Concentric and Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol.36-5, pp.473.
- [3] Karki, K.C. and Patankar, S.V., 1989, "Pressure Based Calculation Procedure for Viscous Flows at All Speeds in Arbitrary Configurations," *AIAA Journal*, Vol.27-9, pp.1167.
- [4] Thakur, S. and Shyy, W., 1993, "Some Implementational Issues of Convection Schemes for Finite-Volume Formulations," *Numer. Heat Transfer, Part B*, Vol.24, pp.31.
- [5] Chai, J.C., Lee, H.S. and Patankar, S.V., 1994, "Treatment of Irregular Geometries using a Cartesian Coordinates Finite-Volume Radiation Heat Transfer Procedure," *Numer. Heat Transfer, Part B*, Vol.26, pp.225.