

비정렬격자계를 사용하는 복합열전달 해석에서의 고-액 계면 처리방법

명 현 국[†]

국민대학교 기계자동차공학부

Solid-Fluid Interface Treatment in Conjugate Heat Transfer Analysis using Unstructured Grid System

Hyon Kook Myong[†]

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received August 30, 2005; revision received April 11, 2006)

ABSTRACT: Conjugate heat transfer (CHT) is the simultaneous, coupled heat transfer within a fluid and an adjoining solid, and the interface treatment plays an important role in its analysis, particularly when using unstructured grid system. In the present paper a new solid-fluid interface treatment in CHT analysis is presented and applied to two typical CHT problems, i.e. natural convections in both concentric thick-walled cylinders and cavity with a centered solid body. The present interface treatment for unstructured mesh clearly demonstrates the same accuracy and robustness as that for typical structured mesh.

Key words: Conjugate heat transfer(복합열전달), Interface treatment(계면 처리방법), Unstructured grid system(비정렬격자계), Natural convection(자연대류), Heat conducting body(열전도 물체), Numerical analysis(수치해석)

기 호 설 명

C_p : 비열 [kJ/kgK]
 g : 중력가속도 [m/s^2]
 k : 열전도계수 [W/mK]
 L : 캐비티의 폭 또는 이중관 상당 직경 [m]
 Ra : Rayleigh 수, $g\beta\Delta TL^3 C_p \rho^2 / \mu k$
 W : 캐비티 내 고체블록의 폭 [m]

그 리 스 문 자

β : 열팽창계수 [$1/K$]
 μ : 점성계수 [kg/ms]

1. 서 론

밀폐된 기계장치 또는 구조물 내부에서와 같이 고체와 유체가 함께 존재하며 열전달에 상호 영향을 미치는 열전달문제는 우리 주변에서 많이 볼 수 있다. 대표적인 예로 설비공학에서 많이 사용되는 배플(baffles), 관, 핀, 베인 등과 같이 내부 고체를 포함하여 구성되는 열교환기를 들 수 있다. 그런데 열에너지 수송이 고-액 계면(solid-

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4714; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: myong@kookmin.ac.kr

fluid interface)을 가로질러 일어날 때 고체에서의 열전도와 유체에서의 대류가 계면에서 적절하게 매칭되도록 고려하여야 하며, 에너지방정식은 고체를 포함하는 전체 영역에 대해 보존적인 방법으로 해석되어야 한다. 이러한 과정을 복합열전달(Conjugate Heat Transfer, CHT) 해석이라고 부른다.

한편, 지난 십수 년에 걸쳐 비정렬격자계를 사용하는 유한체적법이 CFD 연구 분야에서 주목을 받고 있다. 그런데 비정렬격자계를 사용하는 경우 복합열전달 해석에서 고-액이 만나는 계면에서의 연속성 문제를 처리하는 방법이 매우 중요하다. 이것은 고-액 계면에서는 단지 온도가 한 가지 값을 갖고, 열유속(heat flux)이 보존된다는 조건만을 사용하여야 하는데, 1차원 및 직각 격자계에서는 조화 평균한 열전도계수가 위의 조건을 만족하지만 비정렬격자계나 경계밀착격자계(비직교격자계)에서는 고-액 계면에서 두 셀 중심을 잇는 벡터가 일반적으로 계면과 직교하지 않기 때문에 단순한 1차원적 식을 사용할 수 없다. 즉, 비정렬 및 비직교 격자계에서는 격자의 비직교에 의한 교차확산을 고려해 주어야 한다.

본 연구에서는 비정렬격자계를 사용하는 복합 열전달해석에서 고-액 계면 처리방법에 대해 고찰한 후 새로운 처리방법을 제시한다. 또한 이 방법을 비정렬격자계를 사용하고 압력수정방법에 기반을 두어 자체적으로 개발한 코드에 접목시키고 두 가지 CHT 문제에 적용시킴으로써 제안한 계면처리방법의 타당성을 확인하여 본다.

2. 비정렬격자계에서 고-액 계면 처리방법

전술한 바와 같이 비정렬격자계나 경계밀착격자

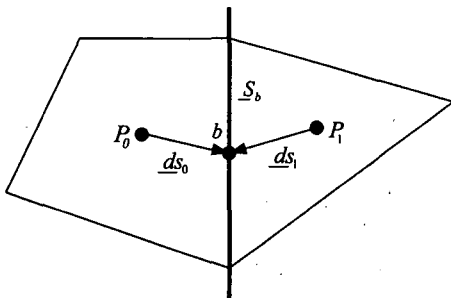


Fig. 1 Control volumes adjacent to interface.

(비직교격자)에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 계면에서 두 셀 중심을 잇는 벡터가 일반적으로 계면과 직교하지 않기 때문에 계면에서의 온도구배 $(\nabla T)_b$ 를 구하기 위해 단순한 1차원적 식을 사용할 수 없고, 격자의 비직교에 의한 교차확산을 고려해 주어야 한다. 현재 계면에서의 온도구배를 구하는 방법으로 상용 CFD 코드에 많이 채택된 방법은 셀 중심의 값으로부터 내삽하여 경계면을 둘러싼 격자점들에서의 T 를 얻으면 셀 면에서 두 셀 P_0 및 P_1 의 중심을 잇는 직선 ds_b 방향과 셀 면의 접선방향으로 온도변화를 알 수 있으므로 국소좌표 변환을 통하여 온도구배 $(\nabla T)_b$ 를 얻을 수 있다.⁽¹⁾ 그런데 이 방법은 정렬격자계에서 널리 사용되고 있는 방법이나, 비정렬격자계에서는 3차원에서 한 면이 삼각형 이상의 다각형이 되므로 여기서 2개만의 방향벡터를 설정하는 것이 어려우며, 또한 각 격자점에 해를 내삽시키는 데에도 많은 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 고-액 계면에서의 열유속을 구하기 위해 주구배항(primary gradient term) 값으로 ds_b 방향의 dT 는 사용하고, $(\nabla T)_b$ 의 나머지 성분, 즉 셀 면의 접선방향의 이차(또는 교차) 구배항(secondary or cross gradient term) 값은 두 셀 중심에서 구한 ∇T 를 거리 가중 평균하여 사용하는 방법을 제안한다. 이 방법은 최근 Myong⁽²⁾이 제안한 확산항 처리방법을 고-액 계면에 그대로 적용시킨 것으로, 계면 양쪽에서의 열유속은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 q_{b0} &= k_0 \frac{S_b}{ds_0 \cdot \hat{n}} (T_b - T_{P_0}) \\
 &+ k_0 \left[\nabla T_{P_0} \cdot S_b \right. \\
 &\left. - (\nabla T_{P_0} \cdot ds_0) \frac{S_b}{ds_0 \cdot \hat{n}} \right] \\
 &= h_0 (T_b - T_{P_0}) + S_0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 q_{b1} &= k_1 \frac{S_b}{ds_1 \cdot (-\hat{n})} (T_b - T_{P_1}) \\
 &+ k_1 \left[\nabla T_{P_1} \cdot (-S_b) \right. \\
 &\left. - (\nabla T_{P_1} \cdot ds_1) \frac{S_b}{ds_1 \cdot (-\hat{n})} \right] \\
 &= h_1 (T_b - T_{P_1}) + S_1
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

위 식에서 \hat{n} 은 고-액 계면에서의 단위 수직벡터이고, ∇T_{P_0} 및 ∇T_{P_1} 은 각각 셀 중심점 P_0 및 P_1 에서의 온도구배의 근사값으로 점을 포함하는 셀에 대해 다음과 같이 가우스정리(Gauss theorem)를 사용하여 각각 구해진다.

$$\nabla T_{P_0} = \frac{\int_{V_{P_0}} \nabla T_{P_0} dV}{V_{P_0}} = \frac{\sum_j (\bar{T} \cdot \underline{S})_j}{V_{P_0}} \quad (3)$$

위 식에서 j 는 셀을 둘러싸고 있는 모든 셀 면을, \underline{S} 는 셀 면의 면적벡터를 각각 의미하며, 셀 면에서의 \bar{T} 값은 셀 면이 내부 면일 경우에는 이웃하는 셀들 중심에서의 온도값을 가중 평균하고, 경계면인 경우에는 경계면에서의 온도값을 직접 사용하여 얻어진다. 따라서 상용 CFD 코드에 많이 채택되고 있는 방법과는 달리 경계면을 둘러싼 격자점에서의 T 를 셀 중심의 값으로부터 내삽하여 얻을 필요가 없다. 또한, 참고로 식(1)과 식(2)에서 우변 첫 번째 항은 주확산항(primary diffusion term)이고, 두 번째 []항은 교차(또는 이차)확산항으로, 직각격자계인 경우는 주확산항만이 존재하나, 비정렬격자계나 경계밀착격자계(비직교격자계)에서는 두 번째 항과 같이 격자의 비직교에 의한 교차확산을 고려해 주어야 한다.

그런데 식(1)과 식(2)에서 q_{b0} 는 계면의 왼쪽 셀에서 계면 면적벡터 \underline{S}_b 방향의 열유속이고, q_{b1} 은 오른쪽 셀에서 $-\underline{S}_b$ 방향의 열유속이므로 $q_{b0} = -q_{b1}$ 인 관계가 성립한다. 따라서 식(1)과 식(2)로부터 다음 관계식이 성립한다.

$$h_0(T_b - T_{P_0}) + S_0 = h_1(T_{P_1} - T_b) - S_1 \quad (4)$$

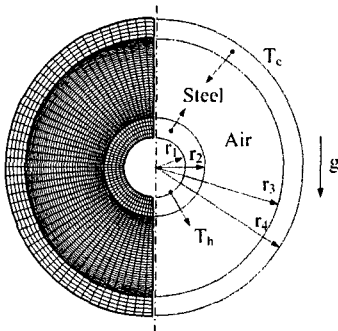


Fig. 2 Meshes and schematic diagram of concentric thick-walled cylinders.

위 식을 정리하면 계면에서의 온도가 식(5)와 같이 구해지고, 식(5)를 식(1)에 대입하면 계면에서의 열유속을 식(6)과 같이 구해진다.

$$T_b = \frac{h_0 T_{P_0} + h_1 T_{P_1}}{h_0 + h_1} - \frac{S_0 + S_1}{h_0 + h_1} \quad (5)$$

$$q_b = \frac{h_0 h_1}{h_0 + h_1} (T_{P_1} - T_{P_0}) - \frac{h_0 S_1 - h_1 S_0}{h_0 + h_1} \quad (6)$$

계면에서의 열유속을 구하는 식(6)의 형태를 보면 우변 첫 번째 항은 주확산항으로부터 얻어진 것으로 조화 평균한 열전도계수 형태를 가지고 있으며, 전술한 바와 같이 1차원 및 직각격자계에서는 이 항만이 존재한다. 그러나 비정렬격자계나 경계밀착격자계(비직교격자계)에서는 두 번째 항과 같이 격자의 비직교에 의한 교차확산이 추가적으로 고려되어야 한다. 또한, 위 식은 첫 번째 항을 직각격자계에서와 같이 내재적으로 처리하고, 두 번째 항을 지연수정(deferred-correction) 방법을 사용하여 생성항에 첨가시킬 수 있는 형태를 가지고 있다. 따라서 결과적으로 해를 안정적으로 구할 수 있게 하는 수치해석방법을 그대로 사용할 수 있으며, 용이하게 CFD 코드에 접목시켜 사용할 수 있는 이점을 가지고 있다.

3. 해석모델 및 수치해석방법

앞에서 제안한 계면 처리방법의 타당성을 평가하기 위해 본 연구에서는 Fig. 2 및 Fig. 3에 제시된 CHT 문제를 해석한다. 먼저, Fig. 2는 상용 CFD 코드에서 CHT 해석지침문제로 제시된 것⁽¹⁾

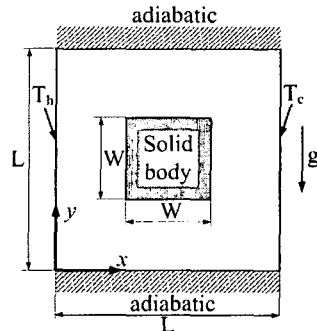


Fig. 3 Schematic of cavity with a centered solid body.

으로, 두꺼운 두께를 가진 이중 원관 사이의 자연대류 열전달을 형상화한 것이다. 여기서 안쪽 강철관 내부면에 높은 온도 $T_h (=273.5\text{ K})$ 가, 바깥쪽 강철관 외부면에 낮은 온도 $T_c (=272.5\text{ K})$ 가 주어지고, 두 고체 관 사이에 공기(유체)가 존재하며 Rayleigh 수 Ra 는 약 10^4 로 층류 유동이다. 한편 Fig. 3은 House et al.⁽³⁾이 검증용 해(benchmark solution)로 제시한 것으로, 2차원 정사각형 캐비티의 중앙에 위치하는 고체 열전도 물체가 자연대류에 미치는 영향을 파악하기 위한 것이다. 즉, 정사각형 캐비티는 두 수직 벽의 온도차에 의해서 자연대류가 발생하며 무차원 길이(W/L)의 고체물체의 열확산계수에 따라 자연대류의 유동 형태 및 등온 수직 벽의 Nusselt 수 Nu 는 변하게 된다.

본 연구에서 사용한 코드⁽⁴⁾(PowerCFD 코드)는 자체 개발한 코드이다. 이 코드는 복잡하고 실제적인 형상에 대한 격자생성이 용이하고, 흥미 있는 국부 형상에 대해 격자를 능동적으로 적용시킬 수 있는 능력을 가지고 있는 비정렬격자계를 사용하고 유한체적법 및 압력수정방법에 기초하여 열/유체 유동문제를 해석할 수 있는 3차원 해석 알고리즘을 사용하고 있다. 즉, 기본적으로 열/유체 유동현상을 지배하는 지배방정식(연속방정식, 운동량방정식 및 에너지와 같은 스칼라량에 대한 지배방정식)을 풀기 위해 현재 대부분의 상용 CFD 해석코드에서 채택하고 있는 유한체적법에 기초하여 벡터와 스칼라값을 모두 제어체적의 중심점에 위치시키는 집중격자계를 사용하며, 미소체적 중심에서의 직교좌표 성분의 속도, 압력 및 스칼라 성분을 주요 종속변수로 채택하고 있다. 또한, 운동량방정식의 압력항 처리를 위하여 연속방정식의 속도와 연관시킨 SIMPLE 계통 알고리즘을 비정렬격자계에 적용시켜 압력수정방정식을 얻는 방법을 확립시켰다. 특히, 본 코드는 대류항 및 확산항을 이산화하기 위해 필요한 셀 면에서의 종속변수 ϕ 값 및 그 구배 $\nabla\phi$ 값을 가우스정리(발산정리)를 이용하여 구하며, 불규칙적이고 여러 가지 형상을 가지는 격자에서도 2차 정확도를 가지면서도 용이하게 코드에 접목시켜 사용할 수 있는 새로운 확산유속(또는 확산플럭스) 근사방법⁽²⁾을 채택하였다. 마지막으로 선형화된 방정식의 해를 얻기 위해 CG(Conjugate Gradient) 방법 계통의 대수술버를 사용하였다. 본

연구에서는 이 코드에 앞 절에서 제안한 고-액 계면 처리방법을 접목시켰다.

계산에 사용된 지배방정식은(무차원화된) 2차원 층류 $N-S$ 방정식과 에너지방정식으로, 이들 식을 풀기 위해 대류항 계산에는 계산의 정확도를 위해 2차 중심차분도식(2nd-order central differencing scheme)을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 이중 원관 사이의 자연대류

Fig. 4는 두꺼운 두께를 가진 이중 원관 사이의 복합열전달을 계산한 것으로, Fig. 4(a)는 순수한 열전도 결과를, Fig. 4(b)는 자연대류 복합열전달(CHAT) 결과를 나타내고 있다. 원관 유동인 경우 모든 격자점 좌표를 Cartesian 좌표계로 나타내고, 벡터적으로 계산을 하는 비정렬격자계 해석법에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 격자계의 비직교성 때문에 교차확산항을 필수적으로 고려해 주어야 한다. 결과를 보면, 순수한 열전도인 경우 Cartesian 좌표계 및 상대적으로 작은 온도차를 사용하였는데도 불구하고 등온선 분포가 이중 원관 사이의 공기층에서 해석적인 해와 같이 반경방향만의 1차원적 함수형태로 나타나는 것을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 복합열전달인 경우 상대적으로 뜨거운 유체가 뜨거운 안쪽 관 벽면을 따라 대칭면까지 상승한 후, 찬 바깥쪽 관 벽면을 따라 하강하다가 맨 아래까지 도달하

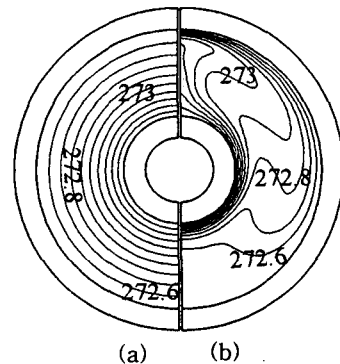


Fig. 4 Predicted isotherms between concentric thick-walled cylinders, (a) pure conduction, (b) conjugate heat transfer.

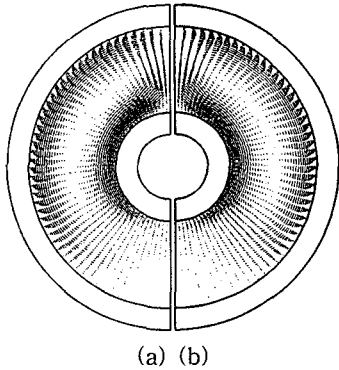


Fig. 5 Comparison of vector plots in conjugate heat transfer between concentric thick-walled cylinders, (a) CFD-ACE result, (b) present (PowerCFD) result.

지 않고 뜨거운 안쪽 벽면 쪽으로 흐르는 양상을 나타내고 있다. 이와 함께, 본 코드로 해석된 이러한 복합열전달에 의한 온도변화 양상 및 예측값 분포는 상용 CFD 코드의 결과⁽¹⁾와도 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

Fig.5는 상용 CFD 코드(CFD-ACE)⁽¹⁾와 본 연구에서 사용된 PowerCFD 코드를 사용하여 예측한 복합열전달에 의한 이중 원관 사이의 유동분포이다. 앞 절에서 기술한 바와 같이 두 코드는 서로 다른 계면 처리방법을 사용하고 있으나, 결과를 보면 두 코드의 결과가 정량적 및 정성적으로 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제안한 비정렬격자계를 사용하는 복합열전달해석에서 고-액 계면 처리방법의 타당성 및 코드의 적합성을 확인할 수 있다.

4.2 캐비티 내에 열전도 물체가 존재하는 경우의 자연대류

Table 1에는 Prandtl 수가 0.71이고, Rayleigh 수가 10^5 이며, $W/L=0.5$ 인 경우에 대해 유체에 대한 고체블록의 열확산비 $\alpha^*(=a_s/a)$ 에 따라 수직 벽의 평균 Nu를 House et al.⁽³⁾의 계산결과와 비교하여 나타냈다. 여기서, Nu는 Hortmann et al.⁽⁵⁾의 정의와 같이 캐비티를 좌우로 가로지르는 실제 열유속을 순수전도로부터 얻어지는 열유속으로 나눈 값으로 정의되며, 실제 열유속은 x 가 일정한 격자라인을 따라 제어체적면을 통과하는

Table 1 Comparison of averaged Nusselt numbers predicted by PowerCFD code and benchmark solution (House et al.) at $Ra=10^5$, $Pr=0.71$, $W/L=0.5$

α^*	Present	House et al. (1990)
0.1	4.6460	-
0.2	4.6251	4.6257
1.0	4.5050	4.5061
5.0	4.3206	4.3221
10.0	4.2562	-

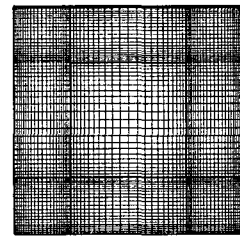


Fig. 6 Grid distribution.

대류 및 확산유속을 합한 값으로 구해진다. 참고로, 계산을 위하여 사용한 격자계는 Fig.6에서 보는 바와 같이 종속변수 구배값이 큰 벽면 및 고체와 유체가 만나는 내부면 근방에 조밀하게 만들어진 비정렬 비등간격 사각격자이다.

Table 1에 제시한 결과에서 고체 물체의 열확산계수가 증가할수록 평균 Nu가 감소하는 것은 순수 자연대류에 비해 열전도 물체의 전도에 의한 열전달이 그만큼 증가하였다는 것을 의미하며, 이 경우 고체 물체의 열전도를 무시할 수 없음을 의미한다. 또한 본 코드의 결과는 표에서 보는 바와 같이 검증용 해⁽³⁾와도 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig.7과 Fig.8은 Table 1에 정의되어진 유체에 대한 고체 물체의 열확산비 $\alpha^*=0.1$ 과 $\alpha^*=10$ 인 경우에 대해 예측된 벡터선도와 등온선도를 각각 보여준다. 여기서 두 경우는 100배의 열확산계수의 비 차이가 존재하나, 두 벡터선도는 Fig.7(a) 및 Fig.8(a)에서 보는 바와 같이 거의 유사하게 나타나고 있다. 또한, 그림으로 제시하지 않았으나 순수 자연대류에서의 벡터선도와 비교해 보아도 열전도 물체가 유동에 큰 영향을 미치고 있지 않음을 확인할 수 있다. 이것은 Fig.7(a)에서 보

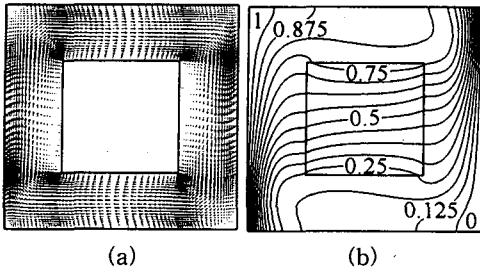


Fig. 7 Equally spaced (a) vector plot and (b) isotherms with $\alpha^*=0.1$ for $Ra=10^5$, $Pr=0.71$ and $W/L=0.5$.

는 바와 같이 이 Rayleigh 수의 순수 자연대류에서는 유체영역의 중심부분에 거의 정지된 영역이 형성되기 때문에 이 경우 물체의 존재가 유동장에 크게 영향을 미치지 않는다. 이 사실은 동일한 조건 하에서 내부에 열전도 물체가 없는 순수한 캐비티 내의 자연대류인 경우에 얻어진 $Nu=4.5294$ 와 비교함으로써도 확인할 수 있다. 즉, 두 가지 경우에서의 Nusselt 수와 열전도 물체가 존재하지 않는 순수 자연대류에서의 Nusselt 수는 Table 1에서 보는 바와 같이 거의 차이가 없다.

그러나 표에서 보는 바와 같이 고체 열전도 물체의 열확산계수가 증가할수록 평균 Nusselt 수가 감소하는 것은 상대적으로 전도에 의한 열전달이 그만큼 증가했다는 것을 의미한다. 즉, Fig. 7(b) 및 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 고체 물체 내부에서 등온선도는 수평면과 거의 평행한데 이것은 상부의 수평 유로를 지나는 높은 온도의 유체와 하부의 수평 유로를 지나는 낮은 온도의 유체 사이에 열전도 현상이 고체 물체를 통해 수직적으로 일어남을 나타내며, 열확산비 α^* 가 1보다 큰 경우(Fig. 8(b))는 높은 열확산율을 가진 열전도 물체가 지름길과 같은 열확산 통로의 역할을 하여 밀폐된 공간에서 온도가 다른 두 벽 사이에서 자연대류에 의한 열확산 현상을 감소시킴을 알 수 있다. 반면, 열확산비가 작은 경우는 고체 물체가 부도체와 같이 작용하여 수평적으로 흐르는 유동이 온도가 다른 두 벽 사이에서 더 효과적으로 열을 전달하므로 순수 자연대류인 경우보다 다소 높은 Nusselt 수를 가지게 된다. 이상의 결과로부터 자연대류가 존재하는 밀폐공간에 열확산비가 낮은 (또는 큰) 고체 블록을 밀폐공간의 중앙에 위치시키면 자연대류

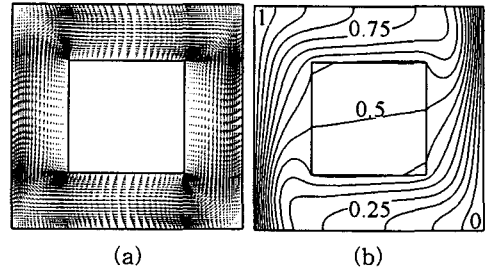


Fig. 8 Equally spaced (a) vector plot and (b) isotherms with $\alpha^*=10$ for $Ra=10^5$, $Pr=0.71$ and $W/L=0.5$.

열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있음이 확인되었다. 또한, 이러한 열전달 및 유체유동에 대한 복합적인 효과로 인해 캐비티 내 열전달은 열전도 물체 크기가 유동 중심부의 정체 영역 정도의 크기에서는 열확산비 $\alpha^*<1$ 인 경우 순수 자연대류에 비해 증가할 수 있음을 알 수 있다. 참고로 2차원 캐비티 내에서의 복합열전달 문제를 대상으로 유체유동과 열전달 과정에서 지배적 인자인 Rayleigh 수, 무차원 열전도 물체의 크기 ζ 와 유체 열확산계수에 대한 열전도 물체의 열확산계수의 비 α^* 등과 같은 매개변수들에 따른 영향에 관한 보다 자세한 사항은 참고문헌⁽⁶⁾에 제시되어 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 비정렬격자계를 사용하는 복합 열전달해석에서 고-액 계면 처리방법에 대해 고찰한 후, CFD 코드에 용이하게 접목시켜 사용할 수 있는 식 형태로 새로운 계면 처리방법을 제시하였다. 즉, 이 방법은 주구배방향값으로 계면을 공유하는 두 인접 셀 중심을 잇는 직선 d_s 방향의 dT 는 사용하고, $(\nabla T)_s$ 의 나머지 성분, 즉 셀면의 접선방향의 이차(또는 교차) 구배방향은 두 셀 중심에서 구한 ∇T 를 거리 가중 평균하여 사용하는 방법이다.

또한 이 방법을 비정렬격자계를 사용하고 압력 수정방법에 기반을 두고 자체적으로 개발한 코드 (PowerCFD)에 접목시키고, 두 가지 전형적인 복합열전달 문제, 즉 두꺼운 두께를 가진 이중 원관 사이의 자연대류 열전달 및 정사각형 캐비티의 중앙에 고체 열전도 물체가 존재하는 경우의

자연대류에 대해 계산하고, 기존의 수치해석값들과 비교 분석을 통하여 제안한 계면 처리방법의 타당성을 검증하였다. 연구결과,

(1) 본 연구에서 제안한 계면 처리방법의 적합성과 타당성이 입증되었다.

(2) 본 연구에서 사용한 PowerCFD 코드의 수치해석방법의 적합성과 정확성이 입증되었다.

(3) 자연대류가 존재하는 밀폐공간에 열확산비가 낮은 (또는 큰) 고체 블록을 밀폐공간의 중앙에 위치시키면 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있음이 확인되었다.

참고문헌

1. CFD-ACE™, 2005, Theory manual, CFD Research Co.
2. Myong, H. K., 2006, A new numerical approximation of diffusion flux in unstructured cell-centered methods (in Korean), to appear in Trans. KSME(B), Vol. 30, No. 4.
3. House, J. M., Beckermann, C. and Smith, T. F., 1990, Effect of a centered conducting body on natural convection heat transfer in an enclosure, Numer. Heat Transfer, Part A, Vol. 18, pp. 213-225.
4. Myong, H. K. and Kim, J., 2005, Development of 3-D flow analysis code using unstructured grid system (1st report, numerical method) (in Korean), Trans. KSME(B), Vol. 30, No. 4, pp. 1049-1056.
5. Hortmann, M., Peric, M. and Scheuerer, G., 1990, Finite volume multigrid prediction of laminar natural convection: benchmark solutions, Int. J. Numer. Methods Fluids, Vol. 11, pp. 189-207.
6. Myong, H. K. and Kim, J. E., 2005, Effect of a centered conducting body on natural convection heat transfer in a two-dimensional cavity (in Korean), Proc. of KSCFE Spring Annual Conf., Kumho Univ., Gumi, Korea, pp. 79-84.