

복사벽면으로 구성된 캐비티 내 전자열유체 유동

한 조 영,^{*1} 채 종 원,² 김 정 훈,² 전 형 열²

HYDROMAGNETIC FLOW IN A CAVITY WITH RADIATIVELY ACTIVE WALLS

Cho Young Han,^{*1} Jong Won Chae,² Jung-Hoon Kim² and Hyoung Yoll Jun²

Hydromagnetic flow in a cavity under a uniform magnetic field is studied numerically. The cavity is comprised of four radiatively active surfaces. Due to large temperature difference inside a cavity, the radiative interaction between walls is taken into account. The coupled momentum and energy equations are solved by SIMPLER algorithm while the radiant heat exchanges are obtained by the finite volume method for radiation. A Wide range of Grashof numbers is examined as a controlling parameter. Resultant flow and heat transfer characteristics are investigated as well.

Key Words : 전자열유체(Hydromagnetic Fluid), 표면복사(Surface Radiation), 그라스호프 수(Grashof Number), 자기장(Magnetic Field)

1. 서 론

도전성 유체(electrically conducting fluid)와 관련된 연구들은 산업계에서의 적용 범위가 폭넓어 지대한 관심을 계속적으로 받고 있는 연구 주제이다. 그 예시로서는 연소공학 분야에서의 도전성을 띠는 이온화된 고온플라스마의 제어, 항공우주분야에서의 경계층 제어, 원자력 발전소의 냉각, 냉각조 내 급속판의 냉각, 지열에너지 추출, 전자열유체(MHD) 발전기의 운용 등을 거론할 수 있다.

최근 많은 연구자들이 산업 현장에서 발생하는 도전성 열 유동에서의 열복사 문제에 상당한 관심을 가지고 있다. 고온의 작업 환경 하에서는 복사 효과가 무시할 수 없을 정도로 중요하게 됨은 자명하다. 공학 분야에서 많은 공정이 고온 환경 하에서 수행되므로, 복사 열전달에 관한 지식은 공정에 필요한 장치를 적절히 설계하기 위해서는 필수적이다. 특히나 공정 중에 존재하는 고온의 전열면의 존재로 인해 그 시스템

의 내재적인 특성상 고온의 표면에 의한 표면복사열전달을 무시할 수 없게 된다.

복사열전달 효과를 무시한 전자열유체의 밀폐 공간 내 자연 대류에 관한 실험은 Seki 등[1]에 수행되었다. 그들은 사각 밀폐 공간에서 중력과 같은 방향으로 외부 자장이 가해질 경우 수은의 층류 자연 대류를 연구했다. 수치적 해석 연구로서는 Ozoe와 Okada[2]가 입방체 밀폐공간 내 저 Pr 수(Prandtl number) 유체에 대해 수치 및 수평으로 가해진 외부 자장의 영향을 전산해석했다. 또한 Rudraiah 등[3]은 중력 방향으로 외부 자장이 가해질 때 도전성 유체로 채워진 2차원 밀폐공간에서의 자연 대류 현상에 관해 수치 모사를 수행한 바 있다. 최근 Kandaswamy 등[4]은 사각밀폐공간 내에서 벽면의 일부가 전열면일 때 도전성 유체의 거동을 수치해석해, 다양한 전열부의 상대적 배치에 따른 열유동 현상을 연구했다.

한편으로 전자열유체가 아닌 일반 열유체 유동에서, 고온의 복사 벽면이 존재하는 경우에 대한 연구는 상당수 수행되었다. 우선 Baek과 Kim[5]은 사각 밀폐공간 내에서 큰 온도차가 존재할 경우 대류 열유동의 발달을 수치적으로 연구했다. 대류 열유동의 발달은 비정상 과정으로 묘사되었으며, 경계 벽면간의 표면복사열전달을 고려하여 해석을 수행했다. 이차원 개방 공동에서 공동의 기울어짐이 있을 때, 자연대류와 표면복사에 의한 열전달의 수치해석은 Hinojosa 등[6]에 의해 연

접수일: 2010년 8월 4일, 수정일: 2010년 9월 3일,

게재확정일: 2010년 9월 10일.

1 정희원, 한국항공우주연구원 사업총괄관리단 사업기획조정실 사업기획관리담당

2 정희원, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성 열/추진팀

* Corresponding author, E-mail: cyhan@kari.re.kr

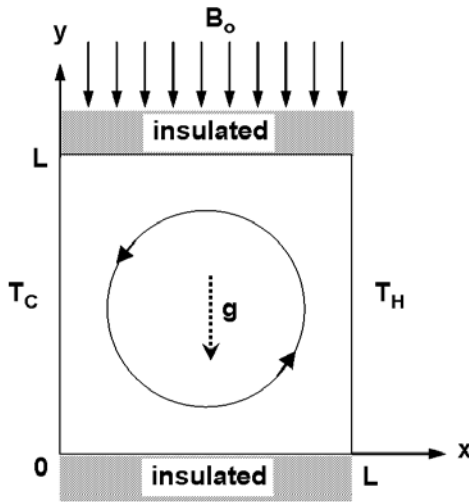


Fig. 1 Analysis model schematic

구되었다. 또한 사각밀폐공간에서 공동의 경사각과 표면복사에 따른 열전달 및 유동 형상 변화는 Bouali 등[7]에 의해 SIMPLER 기법을 이용해서 연구되었다. Sharma 등[8]은 액체 금속 고속증식로(fast breeder reactor)의 수치적 모델을 고려하고, 사각공동 내부에서의 난류 자연대류와 표면복사를 연계하여 해석을 수행했다. 그들의 모델은 사각공동 하부면에서 전 열되고 그의 벽면에서는 냉각되어 물리적인 현상을 구현했으며, 내부 매질은 공기로 가정했다. 좀 더 복잡한 수치모델로써, Nouanegue 등[9]은 고체벽면으로 둘러싸인 사각공동에서 공동의 기울어짐에 따른 대류와 복사의 영향 및 전도 현상을 결합해 연구를 수행했으며, 이들의 모델에서 전열면은 일정 열유속을 부가하는 것으로 가정되었다.

전자열유체 열유동에서 복사 효과를 고려하는 연구는 Chamkha[10], Seddeek[11], Ghaly[12] 및 Raptis 등[13]에 의해 수행되었다. 그러나 이들의 연구는 전자열유체 경계층 유동에서의 복사 효과를 연구한 것으로 유체매질의 복사 특성을 단순화하여 매우 간단한 복사 원천항(source term)만을 고려해 상사해(similarity solution)를 이용해 해석을 수행했다. 이들의 연구 방식은 경계층 모델의 특성상 복사 표면 간의 복사열전달을 계산하는 것이 적절하지 않아서이기 때문이기도 하다. 한편 Mahmud와 Fraser[14]는 수직채널에 수평 방향 자기장이 가해질 때 야기되는 전자열유체의 혼합대류유동에서 해석적으로 복사 효과를 고려하기는 했으나, 연구 맥락상 전자의 연구와 크게 다르지 않다.

이상의 연구들을 종합해 볼 때, 밀폐공간 내 도전성 유체의 열유동에서 복사 벽면 간의 표면복사열전달을 고려한 연구는 찾아보기 힘들다. 그러므로 본 연구에서는 균일한 외부

자장의 영향 하에 있는 도전성 유체로 충만한 사각 밀폐공간 내에서 발생하는 열유체역학적 거동에 대해 연구하며, 고온의 벽면에 의한 표면복사 효과를 결합해 기존 연구와는 다른 형태의 해석을 수행한다. 표면복사 해석은 향후의 연구에서 내부 매질의 복사매개변수 해석에 순응해 일관성을 유지할 수 있도록 유한체적복사해법[15]을 이용해 산정한다. 궁극적으로 Gr 수(Grashof number) 및 Ha 수(Hartmann number)를 주 매개변수로 삼아 도전성 유체의 열유동 특성과 그에 따른 열전달 특성을 평가하고 심도 있게 논의한다.

2. 이론 모델

Fig. 1에 본 연구에 이용된 정방형 2차원 밀폐 공간의 해석 모델이 도시되어 있다. 밀폐 공간 내부에는 점성 및 비압축성인 도전성 유체가 충만해 있으며, 공동의 수직 측벽은 T_H 의 온도로 가열되고 반대편 측벽은 T_C 의 온도로 냉각된다. 상하 수평 벽면은 열적으로 단열되어 있다. 도전성 유체에는 중력과 평행한 수직 방향의 균일 자장 B_0 가 가해져 있다. 한편 유기전류(induced electric current)는 가해진 자장을 심각하게 변형시키지는 않는다고 부연 가정한다. 점성 소산과 주울 발열(Joule heating or Ohmic dissipation)을 무시하면 정상, 층류 유동의 질량, 운동량 및 에너지 방정식은 다음과 같다. 단 밀도를 제외하고는 도전을 σ 를 포함한 유체의 모든 물성치가 일정하다고 가정하고 Boussinesq 근사를 부력항에 적용해 온도에 따른 밀도 변화 효과를 고려했다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_m}{\partial x} + \nu \nabla^2 u - \frac{\sigma B_0^2}{\rho} u \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_m}{\partial y} + \nu \nabla^2 v + g\beta(T - T_0) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(vT) = \alpha \nabla^2 T \quad (4)$$

위 식에서 u, v 는 각각 x, y 방향 속도 성분을 나타내며, 압력과 온도는 p 와 T 로 표현된다. 관련된 유체의 물성치는 동점성계수 ν 와 열확산계수 α 및 도전을 σ 와 체적팽창계수 β 이다. 모든 물리적 변수들의 무차원화는 다음의 무차원 변수 및 무차원수를 도입하여 수행된다.

$$x^* = x/L, y^* = y/L, u^* = u/u_0, v^* = v/u_0 \quad (5)$$

$$p^* = \frac{p - p_o}{\rho_o u_o^2} = \frac{p_m}{\rho_o u_o^2}, T^* = \frac{T - T_o}{T_H - T_C}, Pr = \nu/\alpha \quad (6)$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha}, Gr = Ra/Pr, Ha = B_o L \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{T_H - T_C}{T_o}, Pl = \frac{k/L}{4\sigma T_o^3}, q^{R*} = \frac{q^R}{\sigma T_o^4} \quad (8)$$

여기에서 참조(reference) 압력은 상압이며, 참조온도는 두 등은 벽면의 평균 온도로 $T_o = (T_H + T_C)/2$ 를 취한다. 참조 속도는 $u_o = \alpha/L$ 로 정의된다. 본 연구의 현상을 지배하는 중요한 무차원수로는 Gr 수, Ha 수 및 Pr 수와 Pl 수가 있다. Pl 수의 물리적 의미는 전도에 대비한 복사의 중요도이다. 또한 δ 는 과열비(overheat ratio)이며 k 는 열전도계수이고, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수로 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 의 값을 가진다. 한편 q^R 은 복사열유속을 나타낸다.

이상에 근거해 질량, 운동량 및 에너지전달 방정식은 다음과 같이 무차원 형태로 나타낸다.

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x^*}(u^{*2}) + \frac{\partial}{\partial y^*}(u^*v^*) = -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + Pr\nabla^2 u^* - Pr Ha^2 u^* \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x^*}(u^*v^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^{*2}) = -\frac{\partial p^*}{\partial y^*} + Pr\nabla^2 v^* + GrPr^2 T^* \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x^*}(u^*T^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^*T^*) = \nabla^2 T^* \quad (12)$$

두 등은 벽면에서의 경계 조건은 다음과 같다.

$$u^* = v^* = 0, T^* = -0.5 \text{ at } x^* = 0 \quad (13)$$

$$u^* = v^* = 0, T^* = 0.5 \text{ at } x^* = 1 \quad (14)$$

상하 단열벽면에는 점착조건이 적용되었으며, 열적 경계조건은 전도와 복사에 대해 단열임을 나타내는 다음의 에너지

평형식[15]으로부터 구할 수 있다. 이 식에서 하첨자 w 는 벽면에서 취한 값임을 나타내며, q_w^{R*} 은 벽면에서의 무차원 복사열유속이다.

$$-\frac{\partial T^*}{\partial y^*}\Big|_w + \frac{q_w^{R*}}{4Pl\delta} = 0 \quad (15)$$

등은 벽면으로의 열전달율을 산정하기 위해 다음의 평균(average) Nusselt 수들을 정의한다.

$$\overline{Nu}^C = \int_0^1 q_w^{C*} dy^* = \int_0^1 \left[-\frac{\partial T^*}{\partial x^*} \right]_w dy^* \quad (16)$$

$$\overline{Nu}^R = \frac{1}{4Pl\delta} \int_0^1 \text{sign}(\hat{n}_w) \cdot q_w^{R*} dy^* \quad (17)$$

$$\overline{Nu}^T = \overline{Nu}^C + \overline{Nu}^R \quad (18)$$

식 (17)에서 \hat{n}_w 은 등은 벽면에 수직인 단위벡터이다. 위 식들에서 \overline{Nu}^C 와 \overline{Nu}^R 은 각각 벽면으로의 전도전열량과 복사전열량에 의한 평균 Nusselt 수이며 이 둘을 합산한 \overline{Nu}^T 는 벽면으로의 평균 총 전열량을 의미한다. 정상상태에서 \overline{Nu}^T 는 벽면에 관계없이 고온과 저온 벽면 모두 동일하다.

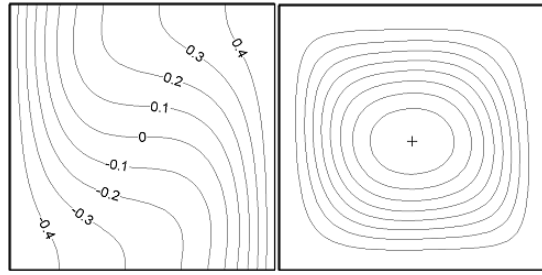
3. 수치 해법

유동장의 수치해석은 엇물림격자(staggered grid)를 사용해 Patankar[16]의 SIMPLER 알고리즘에 입각해 수행되었다. 대류항은 고차 풍향차분법(upwind scheme)인 QUICK scheme[17]을 사용했으며 확산항들에는 종속변수의 선형적 분포를 가정했다. 복사열유속 산정을 위해 Chai 등[18]이 제안한 선형화된 복사전달방정식(linearized RTE)을 사용해 복사장의 수치 해석을 수행했다. 전체 계산 영역은 여러 단계의 격자 민감도 시험(grid sensitivity test)을 거쳐 공간적으로는 수치 계산에 효율적인 51×51 개의 비균일 격자계로 분할했고, 전체 입체각 4π 는 2×24 개의 균일 제어각도(control angle)로 분할했다.

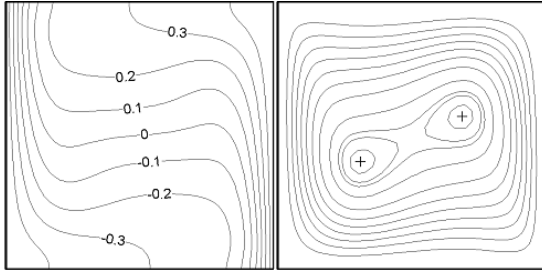
수치 계산의 수렴 조건은 속도와 온도의 L2-norm과 공동 내 열평형을 고려해 다음과 같이 할당했다.

$$\| \text{velocity} \|_2 \leq 5 \times 10^{-5}, \| T \|_2 \leq 5 \times 10^{-5} \quad (19)$$

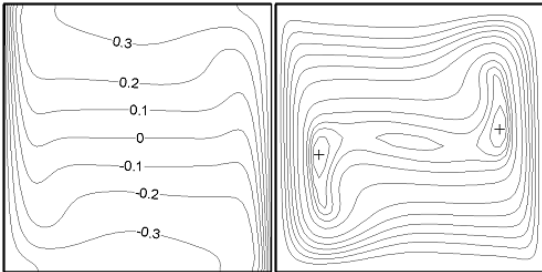
$$\left| \overline{Nu}_H^T - \overline{Nu}_C^T \right| \leq 10^{-3} \quad (20)$$



(a) $Gr = 10^4, \Psi_{max} = 4.45;$



(b) $Gr = 10^5, \Psi_{max} = 8.95$



(c) $Gr = 10^6, \Psi_{max} = 15.8$

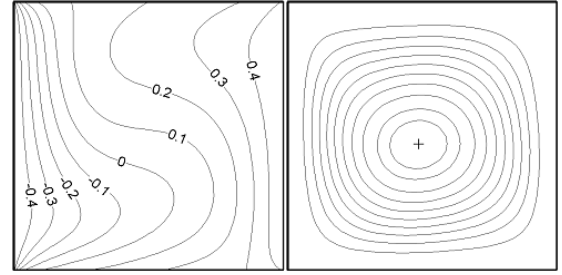
Fig. 2 Isotherms and streamlines for $Ha = 0$ without radiation:

식 (20)의 하첨자 H와 C는 각각 고온 및 저온 등온 벽면을 지시한다.

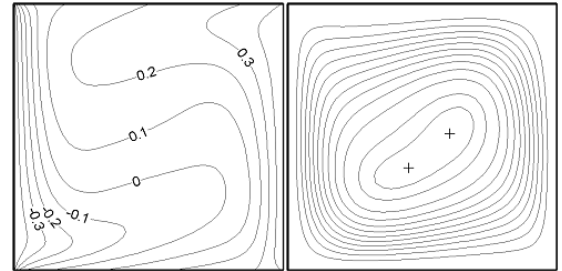
본 연구에 사용된 계산 기법은 한 등[19]의 연구 및 Han과 Baek[20]의 연구에 상세히 기술되어 있으며, 계산 기법에 대한 검증 또한 충실히 수행되어 있으므로, 본 논문에서는 이를 재차 언급할 필요가 없을 듯해 중략한다.

4. 결과 및 검토

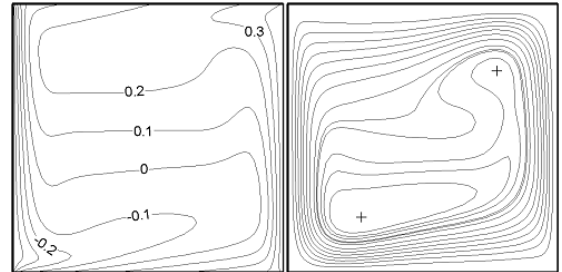
중력과 같은 방향의 수직 자장이 가해지는 2차원 사각 공동에 충만해 있는 도전성 유체의 자연 대류 유동에 대한 수치 해석 결과가 제시된다. 밀폐 공간의 두 수직 벽면은 등온이며 좌측 벽면은 가열되며 우측 벽면은 냉각된다. 단열 조건이 천정과 바닥 벽면에 적용된다. Gr 수의 범위는 10^4 에서 10^6 이며 Ha 수는 0에서 100이다. 본 연구에서 이차원 층류 유동



(a) $Gr = 10^4, \Psi_{max} = 5.08$



(b) $Gr = 10^5, \Psi_{max} = 11.7$



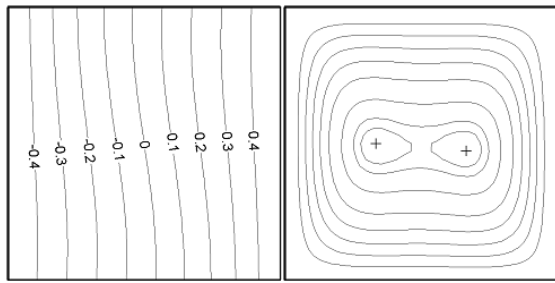
(c) $Gr = 10^6, \Psi_{max} = 21.4$

Fig. 3 Isotherms and streamlines for $Ha = 0$ with radiation

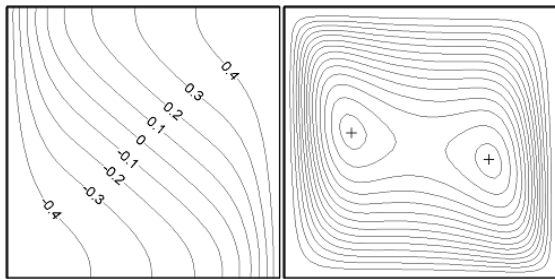
이라 한 가정은 위의 Gr 수 범위에서는 타당하다[21]. 정방형 동공의 벽면은 흑체 벽면(black wall)으로 가정하여 물리적 모델을 구성했으며, 매질의 Pr 수는 0.733으로 고정했다. 양 등온 벽면의 온도차는 과열비를 $\delta = 2/3$ 으로 하여 고온 벽면의 온도가 저온 벽면 온도의 2배($T_H = 2T_C$)가 되도록 할당했다. 한편 PI 수는 0.02를 사용하여 일정한 전도에 대비 복사 중요도를 구현했다.

4.1 자장이 존재하지 않을 경우 Gr 수 영향

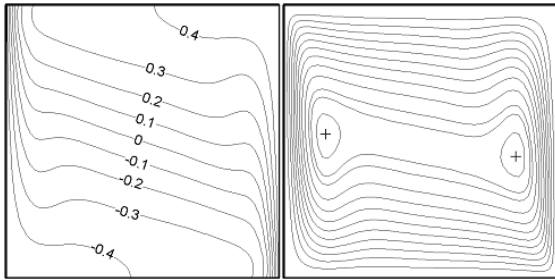
표면복사가 존재하지 않을 경우 Gr 수 영향에 따른 유동장 및 온도장의 변화를 Fig. 2에 도시했다. $Gr = 10^4$ 으로 낮은 값의 경우, 한 개의 순환 유동이 동공 내에 존재한다. Gr 수가 증가함에 따라 순환 유동의 중심은 2개로 분리되며, 공동 중심부 온도장의 성층화는 심화된다(Fig. 2(b)). $Gr = 10^6$ 의 경우 좌우 등온벽 부근에 경계층이 발달되어 속도와 온도의 급



(a) $Gr = 10^4, \Psi_{max} = 0.34$



(b) $Gr = 10^5, \Psi_{max} = 2.81$

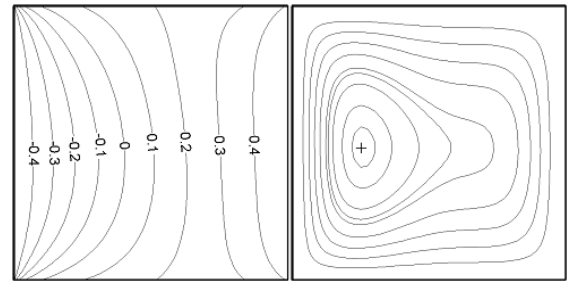


(c) $Gr = 10^6, \Psi_{max} = 11.4$

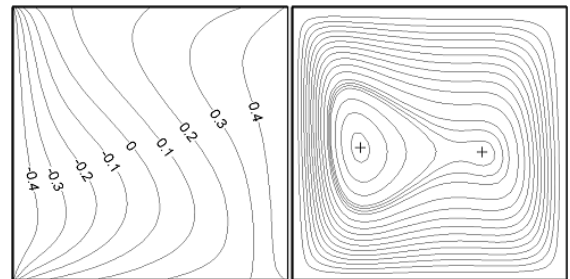
Fig. 4 Isotherms and streamlines for $Ha = 50$ without radiation

격한 구배가 존재하고 있다. 수직 방향으로 온도의 성층화는 더욱 현저해져, 온도 구배가 0에 가까워질 정도로 되어 전도에 의한 열전달이 거의 발생하지 않아 대류가 주된 열전달 기구가 된다. 유선 형상을 보면 가열 벽면 부근에서는 강한 상승류가 발생하고, 반면 냉각 벽면 부근에서는 하강류가 발생한다.

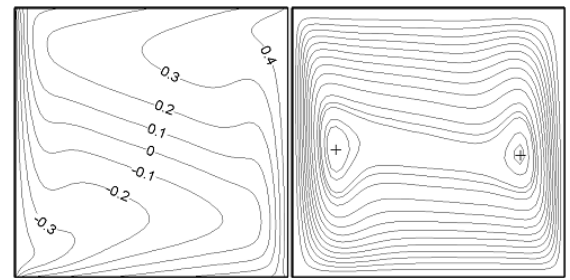
반면 공동이 복사 벽면으로 구성된 경우, Gr 수의 영향에 따른 유동장 및 온도장의 변화는 Fig. 3에 도시된 바와 같다. 온도장의 경우 Gr 수에 관계없이 고온벽과 저온벽 간의 복사열 상호 작용에 의해 온도장의 저온부($T^* < 0$)는 저온 벽면 쪽으로 수축되어 있다. 증가된 복사열전달의 기여도로 인해 단열벽에서의 온도 구배는 더 급격해진다. Gr 수가 비교적 낮은 Fig. 3 (a)와 (b)의 경우 유동장의 전체 형상은 표면복사가 존재하지 않는 경우에 비해 큰 차이가 없다. 그러나 Gr 수가 10^6 으로 증가하는 경우 유동장은 비대칭의 다세포 유동



(a) $Gr = 10^4, \Psi_{max} = 0.39$



(b) $Gr = 10^5, \Psi_{max} = 3.21$



(c) $Gr = 10^6, \Psi_{max} = 12.9$

Fig. 5 Isotherms and streamlines for $Ha = 50$ with radiation

(multicell flow)을 형성한다. 내부 유동 중심부에서는 하반부의 주대류 유동(primary convective roll)과, 상반부의 보다 약한 부대류 유동(secondary convective roll)으로 구성된다. 또한 유동장의 강도는, 최대 유량함수치(Ψ_{max})로 제시되었듯이, 표면복사가 존재하는 경우에는 더 증가한다.

4.2 자장이 존재할 경우 Gr 수 영향

본 연구에서는 Ha 수를 50으로 고정하여 자장이 존재할 경우의 유동장 및 온도장의 변화를 연구했다. 우선 Fig. 2와 4를 비교해 내부 유동장과 온도 분포에 대한 전자기 체적력의 전반적인 영향을 고찰해 보면, Ha 수의 증가에 따라 공동 중심부의 온도 성층화는 파괴되며, 양쪽 수직 벽면에서의 열경계층이 파괴됨을 볼 수 있다. 또한 유선은 횡방향으로 신장되며 유선축의 기울어짐이 나타난다. 이는 Lorentz력에 의한 유동 저지 효과(retarding effect) 때문이며, 더불어 전반적인 유동

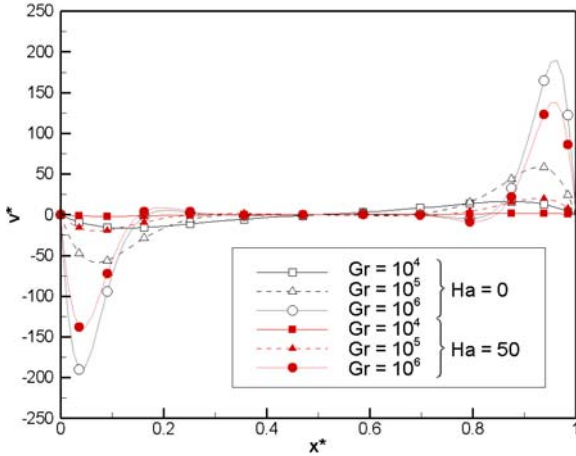


Fig. 6 Vertical velocities at midplane without radiation

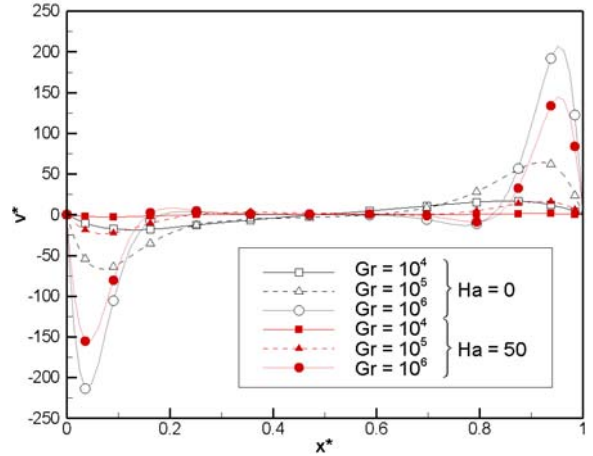


Fig. 7 Vertical velocities at midplane with radiation

의 강도가 약해져 대류열전달 효과는 감소함을 알 수 있다. 복사 벽면이 존재하지 않는 경우 Gr 수 별로 자장의 영향을 살펴보면 다음과 같다. 매우 낮은 Gr 수의 경우(Fig 4 (a)), 자장의 영향에 의해 중앙 유선은 신장되며, 한 개였던 유동 중심이 두 개로 분리되어 나타난다. 등온선은 거의 수직으로 정렬되어 대부분의 열전달이 전도에 의해 발생한다. 따라서 자장의 주 영향은 두 등온 벽면간의 열전달을 심각히 저하시키게 된다. Gr 수가 점차 증가하면, Lorentz 력에 의한 유동 저지 효과가 증가해 좌측의 유동세포(convective cell) 중심이 상부로 이동하는 반면, 우측의 유동세포 중심은 하부로 이동한다. 이로 인해 유선축의 기울어짐이 발생한다(Fig. 4 (b)). 온도장은 Gr 수의 증가에 따라 대류의 영향을 받아 분포가 변화하며, 공동 중심부 등온선의 수직기울기(normal gradient)가 증가한다. 특이할 점은 Gr 수가 증가하더라도 유선축의 기울기는 별반 변화하지 않지만, 공동 중심부 등온선의 수직기울기는 영향을 많이 받는다는 것이다. 즉 자장이 존재하지 않는 경우 Gr 수가 증가하면 대류 증가로 인한 경계층 발달로 공동 중심부의 온도 성층화가 진행되지만, 충분한 크기의 자장이 존재하면 Gr 수의 증가에 따라 마치 중력 방향과 일정한 각을 유지하며 그 방향으로 성층화가 진행된다. 이 같은 맥락에서 미소 중력이 존재하는 우주공간에서는 자장을 가해줌으로써 가상 중력이 존재하는 효과를 얻을 수 있으며, 이러한 현상은 우주공간에서의 신물질 제조 및 우주인 식음료 정수 과정 등에 응용될 수 있는 것이다.

한편 공동이 복사 벽면으로 구성된 경우, Gr 수의 영향에 따른 유동장 및 온도장의 변화가 Fig. 5에 도시되어 있으며, 복사 효과에 따라 내부 열유동의 형태가 심각히 변화함을 관찰할 수 있다. 우선 Fig. 4와 비교해 거시적인 복사효과를 고찰하면, 표면복사가 존재하지 않을 경우 거의 대칭이었던 등

온선의 분포가 파괴되어, 온도장의 고온부($T^* > 0$)는 공동 중앙부로 확장된다. 벽면 간의 복사 간섭에 의해 상하 단열벽면 부근에서의 온도 구배는 증가하며, 전반적인 유동 강도는 증가한다.

Gr 수에 따른 표면복사 존재시의 열유동장 변화를 검토하면, Gr 수가 낮은 Fig. 5 (a)의 경우 복사가 존재하지 않는 경우(Fig. 4 (a))에 비해 유동강도는 소폭 증가하며, 2개로 분리되었던 유동의 중심은 좌측 냉각벽면 부근의 단일세포 유동으로 변한다. 이는 복사효과에 의해 우측 가열벽면에 비해 좌측 냉각벽면 주변에서 온도구배가 더 커져서, 이에 따른 밀도 변화가 심화되어 유동의 중심이 이 부근으로 이동하는 것으로 사료된다. Gr 수가 증가하면, Fig. 5 (b)와 같이 중심 유동이 횡방향으로 신장되며 유동의 중심은 분리되어 2개로 나타나기 시작한다. 등온선의 분포 역시 이 같은 현상을 충실히 설명해주고 있다. Gr 수가 10^6 이 되면, 유동의 중심은 완전히 분리되어 공동의 좌우측에 분리되어 위치하게 되며 유선축의 기울어짐은 뚜렷해진다. 온도장을 보면 공동 중심부에서 등온선의 기울어짐이 뚜렷해져, 온도장에 대한 자장의 영향이 공동 중심부에는 지배적으로 잔재하고 있음을 볼 수 있다. 즉 Gr 수가 높을 때는 경계층의 발달로 인해 표면복사의 영향은 벽면 부근에 주로 국한되지만, 자장의 영향은 공동 중심 부분에서 지배적임을 관찰할 수 있다. 반면 Gr 수가 상대적으로 낮을 때에는 시각상 자장의 영향으로 인지되는 유선축 및 등온선의 기울어짐은 명료하게 관측되지 않는다.

4.3 중앙단면에서의 속도 및 온도 분포 비교

Fig. 6과 7에는 복사벽면의 유무에 따른 수평중앙 단면(mid-height)에서의 무차원 속도 분포를 도시했다. 복사벽면의 유무와 관계없이 동일 Gr 수에서는, 자장과 평행한 수직속도

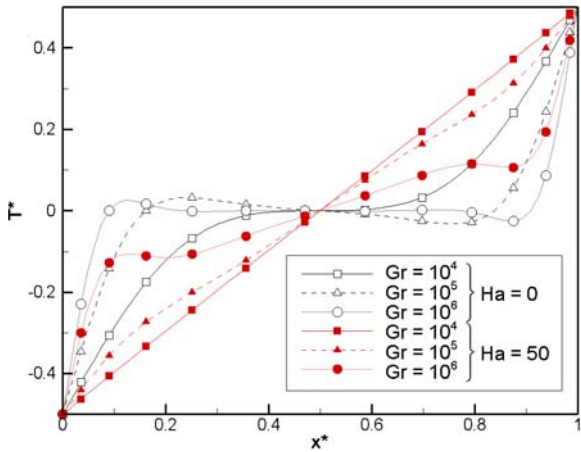


Fig. 8 Temperature distribution at midplane without radiation

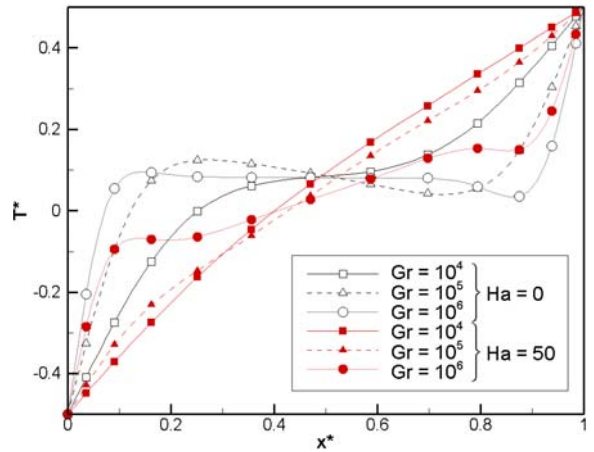


Fig. 9 Temperature distribution at midplane with radiation

v^* 가 자장의 영향을 받아 Ha 수의 증가에 따라 감소한다. 자장에 의한 유동의 억제(suppression) 현상은 앞의 이차원 유동 형상에서 예측했듯이 유동장 전체의 속도를 저하시키며, 벽면 부근에서의 속도 최고치(velocity peak)를 감소시키고 있다.

한편으로 위의 두 그림, Fig. 6과 7에서 우선 자장이 존재하지 않을 경우(Ha = 0)에 복사벽면의 존재에 따른 수직 속도 변화를 고찰하면, 중심부의 유동은 거의 정적이며, 복사벽면이 존재할 경우 벽면 부근에서의 속도 최고치가 증가한다. 자장이 존재하는 경우(Ha = 50) 복사효과에 따른 속도 변화를 고찰하면, 같은 Gr 수에서는 벽면 부근에서의 속도 최고치가 복사벽면이 존재할 경우 더 크다. 따라서 자장은 유동을 억제하는 효과를 가지지만, 반대로 표면복사의 존재는 유동을 촉진하는 상반된 효과를 나타내고 있다.

Fig. 8과 9에는 복사벽면의 유무에 따른 수평중앙 단면에서의 온도 분포를 도시했다. 같은 Gr 수에서 복사효과에 상관없이 Ha 수의 증가에 따라 온도 분포의 기울어짐이 심화되어 나타난다. 한편 복사벽면이 존재할 경우는 Ha 수와 무관하게 중앙부에서의 온도 증가를 관찰할 수 있다. Ha = 0의 경우 복사와 무관하게 Gr 수의 증가에 따라 벽면 부근에 열경계층이 발달됨을 볼 수 있으나, Ha = 50이 되면 Gr 수가 10^6 이하

에서는 대류의 영향이 거의 없이 대부분 전도에 의한 온도 분포가 형성된다.

Table 1에는 Ha 수를 매개변수로 하여, Gr 수와 전 평균 Nu 수(total average Nusselt number)의 관계를 제시했다. 복사 유무와 무관하게 일정 Ha 수에 대해 Gr 수가 증가하면 총전 열량 \overline{Nu}^T 는 증가하며, Gr 수가 일정할 때 Ha 수의 증가에 따라 총전열량은 감소한다. 더불어 표면복사의 개입에 의해 복사벽면이 존재할 때는 총전열량은 큰 폭으로 증가하고 있다.

5. 결론

중력과 평행한 방향의 균일 자장이 가해질 때, 복사벽면으로 구성된 캐비티 내 도전성 유체의 열유동 해석을 수행했다. 자장 영향의 척도인 Ha 수와 유동장의 Gr 수 변화를 주요 매개변수로 채택하여 도전성 유체의 열유동 특성과 그에 따른 열전달 특성을 평가하고, 캐비티 복사벽면의 복사 특성에 따라 발생하는 열유동장 변화를 심도 있게 논의했다.

자장이 존재하지 않을 경우 캐비티 내 열유동 형태는 표면 복사에 의해 크게 변화한다. 복사에 의해 온도장의 고온부는 공동 중앙부로 확장되며, Gr 수의 증가에 따라 유동장은 비대칭의 다세포 유동으로 변화한다.

자장이 작용할 경우에도 복사 효과에 의해 내부 열유동의 형태는 심하게 변화한다. 복사가 존재하지 않는 경우에는 자장의 작용에 의한 유동 저지 효과로 인해 유선은 횡방향으로 늘어나며, Gr 수의 증가에 따라서 유선축의 기울어짐이 심화된다. 반면 표면복사가 존재하는 경우에는 거의 대칭이었던 등온선의 분포가 파괴되어, 온도장의 고온부는 공동 중앙부로

Table 1 Total average Nusselt numbers vs. Grashof numbers

Ha	\overline{Nu}^T					
	Without radiation			With radiation		
	Gr= 10^4	10^5	10^6	Gr= 10^4	10^5	10^6
0	2.0309	4.1308	8.1407	40.426	41.916	45.014
10	1.6741	3.9763	8.0830	40.173	41.751	44.949
50	1.0530	1.9559	6.8041	39.846	40.208	43.621
100	1.1028	1.1339	4.3262	39.842	39.879	41.520

확장된다. 유동장의 경우 전반적인 유동 강도는 증가하며, Gr 수가 낮을 경우 유동 형상이 심각히 변화하지만, Gr 수가 높은 경우는 전체 유동 형상이 복사가 존재하지 않는 경우와 큰 차이가 없다. 이와 같이 표면복사는 Gr 수가 낮을 경우 유동 형상 및 온도 분포에 매우 큰 영향을 끼친다. 그러나 Gr 수가 높으면 유동 구조에 대한 표면복사 효과는 뚜렷하게 나타나지 않지만, 온도 분포에 미치는 영향은 벽면 부근에서 크게 나타난다. 더불어 등온선의 기울어짐은 계속 유지되고 있어, 유동 강도가 약한 공동 중심부에서는 상대적으로 자장의 영향이 지배적으로 나타난다.

참고문헌

- [1] 1979, Seki, M., Kawamura, H. and Sanokawa, K., "Natural convection of mercury in a magnetic field parallel to the gravity," *J. Heat Transfer*, Vol.101, pp.227-232.
- [2] 1989, Ozoe, H. and Okada, K., "The effect of the direction of the external magnetic field on the three-dimensional natural convection in a cubical enclosure," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol.32, pp.1939-1954.
- [3] 1995, Rudraiah, N., Barron, R.M., Venkatachalappa, M. and Subbaraya, C.K., "Effect of a magnetic field on free convection in a rectangular enclosure," *Int. J. Engng. Sci.*, Vol.33, pp.1075-1084.
- [4] 2008, Kandaswamy, P., Sundari, S.M. and Nithyadevi, N., "Magnetoconvection in an enclosure with partially active vertical walls," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol.51, pp.1946-1954.
- [5] 2002, Baek, S.W. and Kim, T.Y., "Effects of surface radiation on the unsteady natural convection in a rectangular enclosure," *KSAS Int. J.*, Vol.3, pp.95-104.
- [6] 2005, Hinojosa, J.F., Cabanillas, R.E., Alvarez, G. and Estrada, C.E., "Nusselt number for the natural convection and surface thermal radiation in a square tilted open cavity," *Int. Comm. in Heat Mass Trans.*, Vol.32, pp.1184-1192.
- [7] 2006, Bouali, H., Mezrhab, A., Amaoui, H. and Bouzidi, M., "Radiation-natural convection heat transfer in an inclined rectangular enclosure," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol.45, pp.553-566.
- [8] 2007, Sharma, A.K., Velusamy, K., Balaji, C. and Venkateshan, S.P., "Conjugate turbulent natural convection with surface radiation in air filled rectangular enclosures," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol.50, pp.625-639.
- [9] 2009, Nouanegue, H.F., Muftuoglu, A. and Bilgen, E., "Heat transfer by natural convection, conduction and radiation in an inclined square enclosure bounded with a solid wall," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol.48, pp.871-880.
- [10] 2000, Chamkha, A.J., "Thermal radiation and buoyancy effects on hydromagnetic flow over an accelerating permeable surface with heat source or sink," *Int. J. Engng. Sci.*, Vol.38, pp.1699-1712.
- [11] 2002, Seddeek, M.A., "Effects of radiation and variable viscosity on a MHD free convection flow past a semi-infinite flat plate with an aligned magnetic field in the case of unsteady flow," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol.45, pp.931-935.
- [12] 2002, Ghaly, A.Y., "Radiation effects on a certain MHD free-convection flow," *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol.13, pp.1843-1850.
- [13] 2004, Raptis, A., Perdakis, C. and Takhar, H.S., "Effect of thermal radiation on MHD flow," *Applied Math. Comp.*, Vol.153, pp.645-649.
- [14] 2002, Mahmud, S. and Fraser, R.A., "Analysis of mixed convection-radiation interaction in a vertical channel: entropy generation," *Exergy, an Internal Journal*, Vol.2, pp.330-339.
- [15] 2009, Han, C.Y., "Hydromagnetic Free Convection of a Radiating Fluid," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol.52, pp.5895-5908.
- [16] 1980, Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington, D.C.
- [17] 1993, Thakur, S. and Shyy, W., "Some implementational issues of convection schemes for finite-volume formulations," *Numer. Heat Transfer B*, Vol.24, pp.31-55.
- [18] 1994, Chai, J.C., Lee, H.S. and Patankar, S.V., "Finite-volume method for radiation heat transfer," *J. Thermophys.*, Vol.8, p.419.
- [19] 2009, 한조영, 전형열, 박웅식, "자장 방향 변화에 따른 밀폐공간 내 도전성 유체의 거동," *한국전산유체공학회지*, 제14권, 제3호, pp.123-130.
- [20] 2000, Han, C.Y. and Baek, S.W., "The effects of radiation on natural convection in a rectangular enclosure divided by two partitions," *Numer. Heat Transfer A*, Vol.37, pp.249-270.
- [21] 1985, Acharya, S. and Goldstein, R.J., "Natural convection in an externally heated vertical or inclined square box containing internal energy sources," *J. Heat Transfer*, Vol.107, pp.855-866.