

# 냉각 실린더의 수평 거리가 저장 용기 내부의 기체 수소 자연대류 현상에 미치는 영향

서영민 · 노현우 · 하동우 · 구태형 · 고락길<sup>†</sup>

한국전기연구원 수소전기연구팀

## Effect of Horizontal Distance of Cold Cylinders on Natural Convection of Gaseous Hydrogen in a Physical Storage Container

YOUNG MIN SEO, HYUN WOO NOH, DONG WOO HA, TAE HYUNG KOO, ROCK KIL KO<sup>†</sup>

Hydrogen Electric Research Team, Korea Electrotechnology Research Institute, 12 Jeongui-gil, Seongsan-gu, Changwon 51543, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
rkko@keri.re.kr

Received 7 June, 2023  
Revised 7 June, 2023  
Accepted 22 June, 2023

**Abstract** >> This study conducted direct numerical simulations of the natural convection phenomena of gaseous hydrogen in a physical storage container containing four circular cylinders. Rayleigh numbers ( $Ra$ ) in the range of  $10^4 \leq Ra \leq 10^6$  and a Prandtl number ( $Pr$ )=0.69 (gaseous hydrogen) were considered. The main parameter is a horizontal distance of four circular cylinders and the values of  $\epsilon_h=0.1, 0.2, 0.3, 0.4,$  and  $0.5$  are considered. The flow and thermal structures and corresponding heat transfer characteristics are investigated with respect to the transition of the flow regime. The time- and surface-averaged Nusselt number on the cylinder surface and the wall of physical storage container increased by about 57% and 69% according to the  $Ra$  and  $\epsilon_h$ , respectively. Thus, the horizontal distance has an influence on the heat transfer characteristics on natural convection of gaseous hydrogen.

**Key words** : Gaseous hydrogen(기체 수소), Natural convection(자연대류), Storage container(저장 용기), Circular cylinder(원형 실린더), Horizontal distance(수평 거리)

## 1. 서론

자연대류 현상은 전자 장치, 냉동기 및 공조 장치, 건물 단열재, 태양 에너지 등을 포함한 수많은 공학 분야에서 발생하게 된다. 이러한 밀폐계 내부에서 발생하는 자연대류의 기본적인 물리적 현상을 규명하

기 위하여 다양한 연구들이 진행되었다. 수소는 높은 에너지 밀도와 오염물질이 발생하지 않는다는 장점으로 인해 에너지 공급 및 활용도가 매우 높은 친환경적인 미래 에너지 자원이다. 그러나 수소 가스의 밀도가 상대적으로 낮기 때문에 저장 및 운송이 매우 어려운 실정이다. 특히 수소 저장 기술은 연료전

지 상용화의 핵심 기술로 부각되고 있으며, 여러 기술적 난제를 극복하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다<sup>1-6)</sup>.

최근 수치 해석 기법의 발달과 함께 밀폐계 내부의 다양한 장애물 형상의 크기와 위치 등을 보다 쉽게 구현할 수 있게 되었다. 선행 연구에 따르면, 밀폐계 내부의 자연대류 열전달 현상은 내부 실린더의 크기 및 위치 등에 큰 영향을 받았다. 대부분의 선행 연구는 차가운 밀폐계 내부에서 뜨거운 실린더로부터 발생하는 자연대류 현상을 고려하였다. 그러나 수소 저장 용기의 경우 극저온을 유지하기 위하여 매우 차가운 열교환기나 냉매를 활용하며, 외기와의 온도 차로 인해 발생하는 자연대류 현상을 분석하는 것이 중요하다.

Kefayati와 Tong<sup>7-10)</sup>은 차가운 원형 실린더를 포함하는 뜨거운 실린더 내부에서 발생하는 자연대류 현상에 관해 유동 및 엔트로피 생성에 관한 분석을 수행하였는데, 실린더의 위치와 크기, 형상 및 밀폐계의 각도 등에 대한 다양한 유동 및 열전달 특성을 분석하였다. 결과적으로 시뮬레이션 파라미터에 따라 밀폐계 내부에서 발생하는 다양한 열유동 특성이 큰 영향을 받았다.

Zemach 등<sup>11)</sup>, Dai 등<sup>12)</sup>, Park 등<sup>13)</sup>은 밀폐계 내부에 차갑거나 뜨거운 실린더가 동시에 존재할 때 발생하는 자연대류 현상에 대해 규명하였다. 해당 연구에 따르면, 밀폐계의 수직 경계와 실린더 사이의 표면 거리, 위치 등이 자연대류에 의해 발생하는 유동 불안정성의 시공간적 특성을 결정하는 데 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

최근 전산 수치 해석을 통한 수소 저장 시스템의 내부에서 발생하는 다양한 현상에 관한 연구들도 발표되고 있다<sup>14-17)</sup>. 해당 연구들은 극저온 고압 액체 수소 공급을 위한 인쇄 기관 열교환기, 밀폐된 공간 내 공랭식 전해질 연료전지의 자연대류 열전달 특성 등을 분석하였다. 하지만 수소 저장 용기 내부에 존재하는 냉각 실린더의 사각 배열 형상에서 실린더의 수평 거리에 따른 자연대류 현상과의 상호작용 효과에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 냉

각 실린더의 수평 거리가 기체 수소가 존재하는 저장 용기 내부의 자연대류 현상에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

## 2. 수치 해석 기법

본 연구에서 사용된 지배 방정식인 연속 방정식, 운동량 방정식 및 에너지 보존 방정식은 2차원, 비정상 및 비압축성으로 가정하였으며, 무차원화된 형태로 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \frac{\partial P}{\partial x_j} + \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i^2} + \theta \delta_{j2} + f_j \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = \sqrt{\frac{1}{RaPr}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} + h \quad (3)$$

부력항의 밀도 변화는 Boussinesq 근사를 적용하였으며, 나머지 유체의 물성치는 일정하다고 가정하였다. 식 (1)-(3)에서 사용된 무차원 변수의 정의는 식 (4)와 같다.

$$t = \sqrt{\frac{g\beta(T_h - T_c)}{L}} t^*, \quad x = LSUBi \frac{x_i^*}{L},$$

$$u_i = \frac{u_i^*}{U_{ref}} = \frac{u_i^*}{\sqrt{g\beta(T_h - T_c)}},$$

$$P = \frac{P^*}{\rho U_{ref}^2} = \frac{P^*}{\rho g\beta(T_h - T_c)}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (4)$$

여기서  $g$ 와  $L$ 은 중력 가속도와 특성 길이이며,  $T$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ 는 각각 차원이 존재하는 온도, 열팽창 계수, 및 밀도이다. 지배 방정식의  $x_i$ ,  $u_i$ ,  $P$ ,  $t$ ,  $\theta$ 는 무차원화된 직교 좌표계, 속도, 압력, 시간 및 온도를 나타낸다. 상첨자 \*는 차원이 존재하는 변수를 의미한다.

본 연구에서는 원형 실린더의 표면을 구현하기 위하여 가상경계법(immersed boundary method)을 사용하였다<sup>18-20)</sup>. 원형 실린더의 표면을 포함하는 격자에서 질량 보존을 만족하기 위하여 식 (1)에 질량 원천  $q$ , 벽면에서의 점착 조건을 만족하기 위하여 식

(2)에 운동량 부가  $f_b$ , 등은 조건을 만족하기 위하여 식 (3)에 열원  $h$ 를 추가하였다. 각 지배 방정식에 포함되는 가상경계법의 파라미터를 계산하기 위하여 2차 정확도의 linear/bilinear interpolation 기법을 사용하였다.

지배 방정식의 공간 이산화는 유한체적법(finite volume method)을 활용하였고, 2차 정확도의 중앙 차분법(central difference scheme)을 사용하였다. 시간에 대한 이산화의 경우, 대류항은 Adams- Bashforth scheme, 확산항은 Crank-Nicolson scheme을 사용하였다. 본 연구에서 지배 방정식에 사용된 무차원 수인 Rayleigh (Ra) 수와 Prandtl (Pr) 수의 정의는 다음과 같다.

$$Ra = \frac{\rho g \beta (T_h - T_c) L^3}{\nu \alpha}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (5)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\nu$ 는 열확산 계수와 동점성 계수를 의미한다.

표면에서 국소의 Nusselt 수와 표면에서 평균화된 Nusselt 수는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$Nu = \left. \frac{\partial \theta}{\partial n} \right|_{wall}, \quad \langle Nu \rangle = \frac{1}{A} \int N dA \quad (6)$$

여기서  $n$ 은 벽면에 수직 방향이며,  $A$ 는 실린더 및 저장 용기 벽면의 표면적을 나타낸다.

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 계산 영역 및 격자를 보여 주고 있다. 저장 용기의 길이는  $L$ 이며, 내부에 존재하는 원형 실린더의 반경은  $R=0.1L$ 이다. 본 연구에서 고려한 Ra 수의 범위는  $10^4$ - $10^6$ 이며, Pr 수는

모든 해석에서 기체 수소의 값인  $Pr=0.69$ 로 고정하였다.

원형 실린더의 표면과 사각 저장 용기 벽면의 속도 경계 조건은 점착 조건이며, 온도 경계 조건은 실린더 표면은 무차원 온도  $\theta_h=0$ , 저장 용기 벽면은 무차원 온도  $\theta_c=1$ 을 가지는 등은 조건으로 설정하였다. 중력 가속도는  $y$ 축의 아래 방향으로 고려하였다. 본 연구에서 고려한 주요 매개변수는 내부 원형 실린더의 수평 거리로  $a_h=0.1L, 0.2L, 0.3L, 0.4L, 0.5L$ 을 각각 고려하였다.

본 연구에서 고려한 격자 시스템은  $L/250$ 의 균일한 사이즈를 활용하였으며, 해당 격자는 격자 의존성 테스트를 활용하여 도출되었다. 또한 본 연구에서 사용되는 수치 해석 기법의 타당성을 검증하기 위해 정육면체 밀폐계 내부에 존재하는 실린더 튜브 사이의 자연대류 열전달 성능 관련 실험 논문<sup>[21]</sup>과 비교 및 분석하였다. Fig. 2와 같이 Ra 수에 따라 실린더 표면에서의 열전달 성능을 비교하였으며, 오차 범위 내에서 잘 일치하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 온도장 선행 해석 비교

Fig. 3은 실린더의 개수에 대한 두 가지 경계 조건에 따른 저장 용기 내부 온도장 선행 해석의 비교 결과를 나타낸다. 선행 해석에서 고려한 Ra 수는  $10^6$ 이며, 실린더의 개수는 1개, 2개, 4개이다. 1개의 실린더의 경우, 가열 실린더에서 플룸이 발생하는 경우와

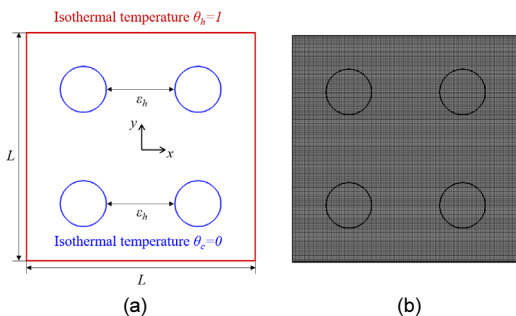


Fig. 1. (a) Computational domain and (b) meshed model

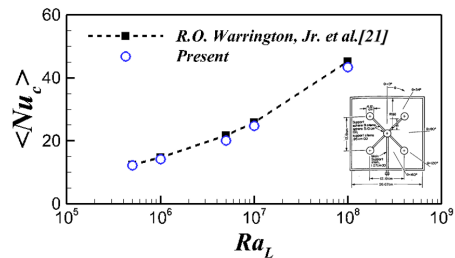


Fig. 2. The variation of surface-average Nusselt number of cylinder with Ra

달리 냉각 실린더에서는 저장 용기 하부에서 플룸이 발생하여 대각 방향으로 실린더로부터 하강하는 유동이 생성된다. 2개의 실린더의 경우, 실린더의 상호작용에 의해 수직 중심선을 기준으로 좌우 비대칭 형태의 강한 유동이 나타나며, 전체적으로 가열 실린더는 상승하는 플룸을 발생시키고, 냉각 실린더는 하강하는 플룸을 발생시키며 저장 용기를 순환하게 된다. 4개의 실린더의 경우, 실린더 사이의 상호작용이 증가하여 저장 용기 내부의 유동 불안정성이 증가하게 된다. 가열 실린더는 저장 용기 상부에서 주로 유동이 불안정하며, 냉각 실린더는 저장 용기 하부에서 유동이 불안정하다. 결과적으로 경계 조건에 따라 저장 용기 내부의 온도장 패턴이 달라지며, 실린더의 개수가 증가할수록 복잡한 온도장이 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 다양한 냉각 실린더가 있는 저장 용기에서는 자연대류 유동 분포를 분석하는 것이 필요하다.

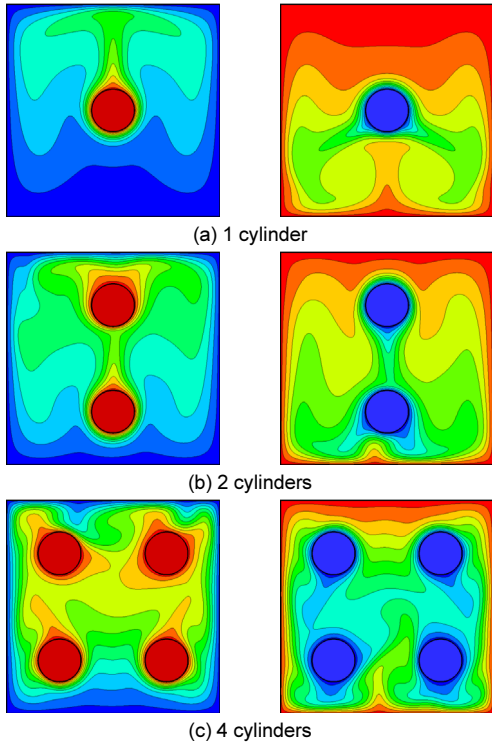


Fig. 3. Comparison of isotherms of two boundary conditions for different numbers of cylinders

### 3.2 유동 영역

Fig. 4는 수소 저장 용기 내부에 존재하는 냉각 원형 실린더의 수평 거리와 Ra 수에 따른 유동 영역을 보여 준다. Fig. 3과 같이 Ra 수가  $10^4$  및  $10^5$ 인 경우 정상 상태 유동이 나타나며  $10^6$ 인 경우 정상 상태 유동뿐만 아니라 다양한 비정상 상태의 유동이 나타나는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 유동 천이가 발생하는 원인을 분석하기 위하여 수소 저장 용기 내부의 다양한 열유동장을 분석하였다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서 고려한 시뮬레이션 파라미터 범위에서 실린더의 수평 거리에 따른 열전달 특성의 변화를 평가하였다.

### 3.3 온도장 및 유선 결과 비교

Fig. 5는 실린더의 수평 거리  $\varepsilon_h=0.3L$ 에서 Ra 수의 증가에 따른 수소 저장 용기 내부의 열유동장을 나타낸다. 온도장의 범위는 0에서 1까지 10개의 수준으로 선정하였다.  $Ra=10^4$ 에서 열유동장은 저장 용기의 수직 중심선을 따라 하강하는 좌우 대칭의 유동이 발생한다. 이를 통해 상하부 실린더 사이에 회전하는 와류를 포함하는 주요 유동에 따라 저장 용기를 순환함을 알 수 있다. 열유동장은 약한 대류의 영향으로 인해 수평 중심선을 따라 약간 비대칭 형상을 띠게 된다.  $Ra=10^5$ 으로 증가하게 되면,  $10^4$ 과 전체적으로 유사한 유동 패턴을 보이지만 대류의 영향으로 인해 상부에서 하강하는 플룸이 증가한다. 이는

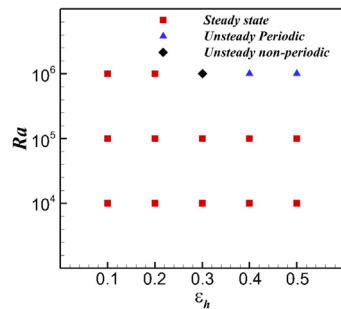


Fig. 4. Bifurcation map for different values of Rayleigh number and horizontal distance of cylinders

좌우 실린더 사이의 하강하는 유동 영역이 증가하기 때문이다.  $Ra=10^6$ 이 되면, 정상 상태에서 비정상 상태로 유동의 천이가 발생하게 된다. 열유동장은 비정상 특성과 함께 상하좌우 비대칭 형상을 띄게 되며, 유동 패턴이 크게 변화한다. 주요 와류 내부에 수많은 2차 와류가 발생하게 되며, 복잡한 유동 패턴을 보인다. 즉,  $Ra$  수가 증가할수록 대류가 증가하게 되며, 이로 인해 실린더로부터 하강하는 유동이 발생하여 실린더 간의 상호작용이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은  $Ra=10^6$ 에서 냉각 실린더의 수평 거리에 따른 수소 저장 용기 벽면에서 열전달 특성에 대한 비정상 시간 이력을 나타낸다.  $\epsilon_h=0.1L$  및  $0.2L$ 인 경우 시간에 관계없이 동일한 정상 상태 유동의 열전달 특성이 나타난다. 그러나  $\epsilon_h=0.3L, 0.4L$  및  $0.5L$ 인 경우 시간에 따라 주기적 혹은 비주기적으로 열전달 특성이 변화하는 비정상 유동이 발생하는 것을 알 수 있다. 즉 수소 저장 용기 내부의 냉각 실린더의 수

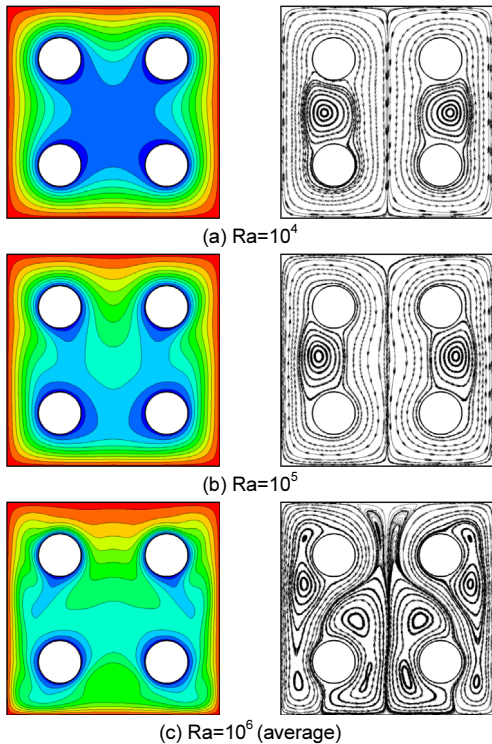


Fig. 5. Distribution of isotherms (contour values range from 0 to 1 with 11 levels) and streamlines with different Rayleigh numbers at  $\epsilon_h=0.3L$

평 간격에 따라 유동 특성이 변화하는데, 이는 유동 천이 및 불안정성에 영향을 끼친다. 따라서 이러한 열유동 특성을 분석하기 위하여 실린더의 거리에 따라 정상 상태 혹은 비정상 상태에서 발생하는  $Nu_{EN}$ 의 최댓값 및 최솟값을 가지는 열유동장을 추가 분석하였다.

Fig. 7은  $Ra=10^6$ 에서 정상 상태에서의 수소 저장 용기 내부의 열유동장을 나타낸다. 냉각 실린더로부터 발생한 차가운 유체는 상대적으로 무거우므로 아래로 이동하는 것을 알 수 있다.  $\epsilon_h=0.1L$ 인 경우 실린더의 간격이 좁아 저장 용기로부터 상승하는 플룸의

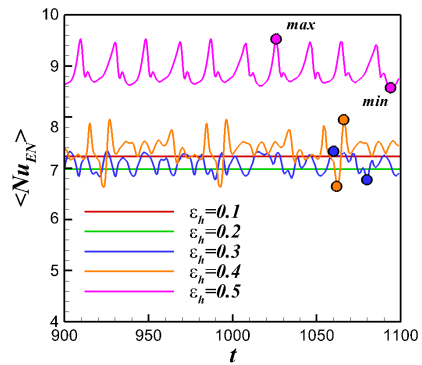


Fig. 6. Unsteady characteristics for  $Nu_{EN}$  with different horizontal distances of cylinders

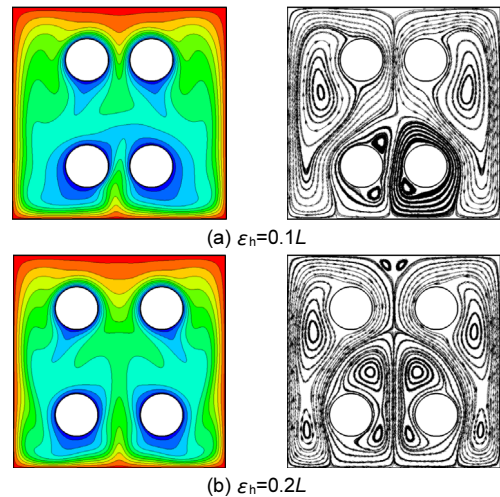


Fig. 7. Distribution of isotherms and streamlines for  $\epsilon_h=0.1L$  and  $\epsilon_h=0.2L$  at  $Ra=10^6$  (steady state)

유동이 제한되고, 이로 인해 좌우 비대칭 구조로 정상 상태에 도달함을 알 수 있다. 실린더의 간격이  $\varepsilon_h=0.2L$ 로 증가하는 경우 상대적으로 실린더 사이에서 유동이 안정화되고 좌우 대칭 구조로 변화하는 것을 알 수 있다. 하부 냉각 실린더 사이에서 상승하는 플룸의 강도가 증가하며, 수소 저장 용기 내부 유동의 안정성에 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 8은  $Ra=10^6$ 에서 비정상 상태에서의 수소 저장 용기 내부의 열유동장을 나타낸다.  $\varepsilon_h=0.3L$ 인 경우 실린더 사이의 공간이 증가함에 따라 하부 벽면에서 증가하는 플룸이 그 공간으로 쉽게 침투하게 된다. 결과적으로 유동 불안정성이 증가하고, 시간에 따라 비주기적으로 하부의 열전달 특성이 변화하게 된다.  $\varepsilon_h=0.4L$ 인 경우 냉각 실린더와 수소 저장 용기의 사이가 어느 정도 가까워지므로 안정적인 2차 와류가 발생하게 된다. 또한 수소 저장 용기 하부에서 발생하는 강한 플룸이 실린더 사이에서 뚜렷하게 관찰되는 등 주기적인 패턴을 가지게 된다.  $\varepsilon_h=0.5L$ 인 경우 냉각 실린더 사이의 공간에서 와류의 크기가 상대적으로 증가하게 되며, 열유동장에서 규칙적인 패턴이 관찰된다. 냉각 실린더 사이의 공간에서 유동 패턴이 주로 변화하므로  $Nu_{EN}$ 의 시간 변화에 대한 주기가 짧아지게 되고, 상대적으로 수소 저장 용기의 열전달 특성이 안정적으로 반복된다. 따라서 실린더 간격에 따른 하부 유동 특성의 변화가 유동 불안정성에 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

### 3.4 열전달 성능 비교

Fig. 9는 냉각 실린더의 수평 간격에 대한 수소 저장 용기 각 벽면에서의 시간 및 표면 평균  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수 프로파일을 나타낸다. 전반적으로  $Ra$  수가 증가할수록 각 벽면에서의  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수가 증가한다. 또한 상부 벽면의  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수는 하부 벽면의  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수보다 작다. 이는 냉각 실린더에서 발생하는, 하강하는 플룸에 따라 수소 저장 용기의 하부의 유동 및 열전달 특성이 큰 영향을 받기 때문이다. 냉각 실린더로부터 발생하는 강한 플룸의 영향으로 인해  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수의

최댓값은  $Ra=10^6$ 의  $\varepsilon_h=0.2L$ 에서 나타난다. 또한 상

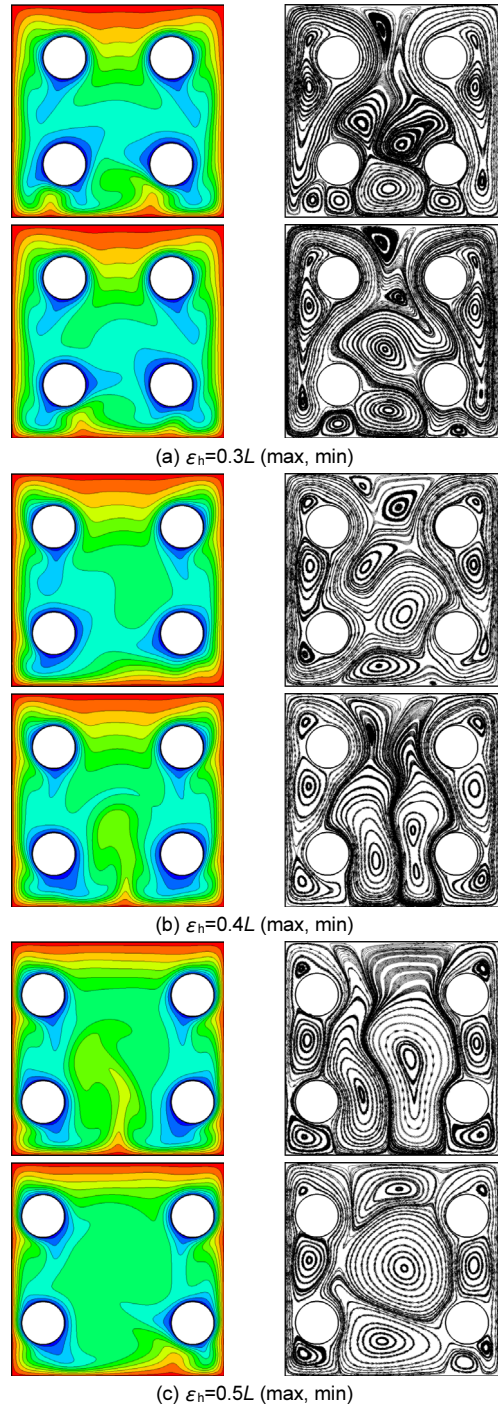


Fig. 8. Distribution of instantaneous isotherms and streamlines for  $\varepsilon_h=0.3L$ ,  $\varepsilon_h=0.4L$ , and  $\varepsilon_h=0.5L$  at  $Ra=10^6$  (transient)

대적으로 약한 플룸이 나타나는  $Ra=10^6$ 의  $\varepsilon_h=0.2L$ 에서  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수의 최솟값이 나타난다. 냉각 실린더의 간격과 관계없이 수소 저장 용기의 좌우 벽면의  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수는 거의 유사하다. 또한, 상부 벽면에서의  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수 변화가 다른 벽면에 비해 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이는  $Ra$  수의 증가에 따라 상부 냉각 실린더와 상부 벽면 사이의 정체 영역이 증가하기 때문이다.

Fig. 10은 냉각 실린더의 수평 간격에 대한 냉각 실린더 및 수소 저장 용기 벽면에서의 시간 및 표면 평균  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수 프로파일을 나타낸다. 전체적으로  $Ra$  수가 증가할수록 대류의 강도가 증가하여  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수가 증가하며, 일부 경우를 제외하고 냉각 실린더의 간격이 증가할수록  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수가 증가한다. 특히 냉각 실린더의 간격이  $0.4L$ 에서  $0.5L$ 로 증가할 때 열전달 특성이 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 특성은 냉각 실린더뿐만 아니라 수소 저장 용기의 벽면에서도 동일하게 나타난다.  $Ra=10^6$ 인 경우, 유동 영역의 천이와 불안정성에 따라 비교적 낮은  $Ra$  수와 경향이 약간 다른 것을 알 수 있다. 평균값을 취했을 경우,  $Ra$  수 및  $\varepsilon_h$ 에 따라 냉각 실린더 표면 및 수소 저

장 용기의  $\langle \overline{Nu} \rangle$  수는 각각 약 56.5%, 69.2% 증가하였다. 따라서 본 연구에서 고려한 다양한  $Ra$  수의 영역에서 실린더 간의 간격이 내부 유동 불안정성에 기여하며, 이는 자연대류에 의해 발생하는 수소 기체 열전달 특성에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는  $Ra$  수가  $10^4, 10^5, 10^6$ 인 영역에서 냉각 실린더 간격  $\varepsilon_h=0.1L, 0.2L, 0.3L, 0.4L, 0.5L$ 에 대한 수소 기체 저장 용기 내부에서 발생하는 2차원 비정상 자연대류 열전달 특성을 조사하였다. 본 연구에서 발생한 비정상 자연대류 영역은 unsteady periodic과 unsteady non-periodic으로 분류하였다. 선형 해석을 통해 기존 해석과의 차이점에 대해 규명하였으며, 상세한 열유동 구조 분석을 통한 자연대류의

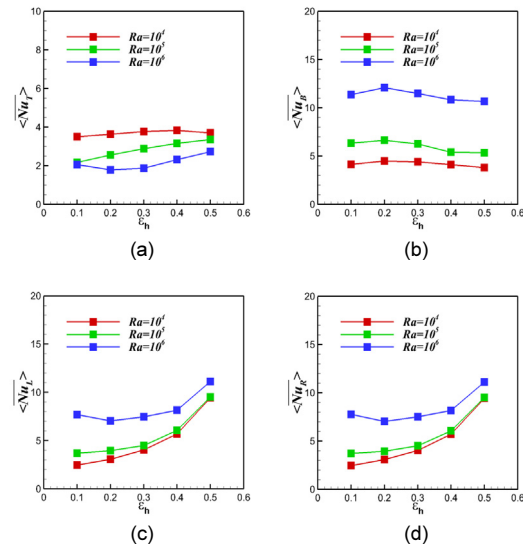


Fig. 9. Time and surface averaged Nusselt number at (a) top, (b) bottom, (c) left, and (d) right

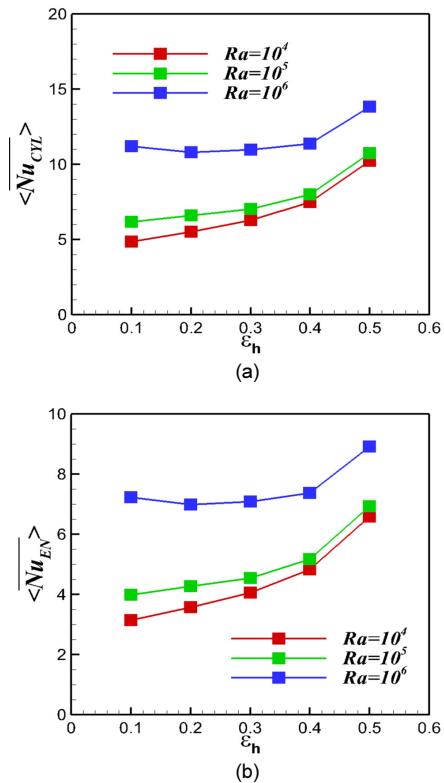


Fig. 10. Time and surface averaged Nusselt number at (a) cylinder and (b) enclosure

특성을 관찰하였다. 관찰 결과 Ra 수가  $10^4$ ,  $10^5$ 인 경우 정상 상태 유동이 나타나며  $10^6$ 인 경우 정상 상태 유동뿐만 아니라 다양한 비정상 상태의 유동이 나타났다. 또한 수소 저장 용기 내부의 냉각 실린더의 수평 간격에 따라 유동 특성이 변화하며 이는 유동 천이 및 불안정성에 영향을 미쳤다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서 고려한 다양한 Ra 수의 영역에서 실린더 간의 간격이 유동 불안정성과 자연대류에 의해 발생하는 수소 기체 열전달 특성에 큰 영향을 미쳤다.

## 후 기

이 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본 사업임(No. 23A01043).

## References

1. N. Agrawal, S. M. Ali, K. Velusamy, and S. K. Das, "A correlation for heat transfer during laminar natural convection in an enclosure containing uniform mixture of air and hydrogen", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 1, 2012, pp. 24-29, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.08.022>.
2. M. Bouhaleb and H. Abbassi, "Natural convection of nanofluids in enclosures with low aspect ratios", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 27, 2014, pp. 15275-15286, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.069>.
3. Y. Horie, Y. Shirai, M. Shiotsu, T. Matsuzawa, K. Yoneda, H. Shigeta, H. Tatsumoto, K. Hata, Y. Naruo, H. Kobayashi, and Y. Inatani, "Film boiling heat transfer properties of liquid hydrogen in natural convection", *Physics Procedia*, Vol. 67, 2015, pp. 643-648, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.109>.
4. G. Wosiak, J. da Silva, S. S. Sena, E. B. Carneiro-Neto, M. C. Lopes, and E. Pereira, "Investigation of the influence of the void fraction on the energy consumption of a vertical electrolyser under natural convection", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 10, No. 3, 2022, pp. 107577, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107577>.
5. X. S. Bai, W. W. Yang, W. Y. Zhang, F. S. Yang, and X. Y. Tang, "Hydrogen absorption performance of a novel cylindrical MH reactor with combined loop-type finned tube and cooling jacket heat exchanger", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 52, 2020, pp. 28100-28115, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.209>.
6. L. Zhao, Q. Zhao, J. Zhang, S. Zhang, G. He, M. Zhang, T. Su, X. Liang, C. Huang, and W. Yan, "Review on studies of the emptying process of compressed hydrogen tanks", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 43, 2021, pp. 22554-22573, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.101>.
7. G. H. R. Kefayati and H. Tang, "Double-diffusive natural convection and entropy generation of Carreau fluid in a heated enclosure with an inner circular cold cylinder (Part I: heat and mass transfer)", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, 2018, pp. 731-750, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.080>.
8. G. H. R. Kefayati and H. Tang, "Double-diffusive laminar natural convection and entropy generation of Carreau fluid in a heated enclosure with an inner circular cold cylinder (Part II: entropy generation)", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, 2018, pp. 683-713, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.081>.
9. G. H. R. Kefayati and H. Tang, "Lattice Boltzmann simulation of viscoplastic fluids on natural convection in an inclined enclosure with inner cold circular/elliptical cylinders (Part I: one cylinder)", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 123, 2018, pp. 1138-1162, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.139>.
10. G. H. R. Kefayati and H. Tang, "MHD thermosolutal natural convection and entropy generation of Carreau fluid in a heated enclosure with two inner circular cold cylinders, using LBM", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, Pt. B, 2018, pp. 508-530, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.026>.
11. E. Zemach, A. Spizzichino, and Y. Feldman, "Instability characteristics of a highly separated natural convection flow: configuration of a tandem of cold and hot horizontally oriented cylinders placed within a cold cubic enclosure", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 159, 2021, pp. 106606, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106606>.
12. C. S. Dai, M. Li, H. Y. Lei, and S. X. Wang, "Numerical simulation of natural convection between hot and cold microtubes in a cylinder enclosure", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 95, 2015, pp. 115-122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.04.008>.
13. Y. G. Park, H. S. Yoon, and M. Y. Ha, "Natural convection in square enclosure with hot and cold cylinders at different vertical locations", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 25-26, 2012, pp. 7911-7925, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.08.012>.
14. S. G. Kim, J. H. Shim, and Y. H. Im, "Numerical simulation



- of hydrogen storage system using magnesium hydride enhanced in its heat transfer”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 26, No. 5, 2015, pp. 469-476, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.5.469>.
15. S. Sohn and W. Kim, “A study on anti-icing design by conjugate heat transfer analysis in a lab-scale printed circuit heat exchanger for supply of cryogenic high pressure liquid hydrogen”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 5, 2022, pp. 541-549, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.5.541>.
  16. J. Lee, S. Kim, and Y. Sohn “An Experimental study on the natural convection heat transfer of air-cooling PEMFC in a enclosure”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 27, No. 1, 2016, pp. 42-48, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNE S.2016.27.1.042>.
  17. K. I. Lee, S. W. Lee, M. S. Park, and C. N. Chu, “The development of cylinder shaped air-breathing PEMFC”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 20, No. 2, 2009, pp. 125-132. Retrieved from <http://koreascience.or.kr/article/JAKO200918133144999.page>.
  18. M. D. de Tullio, P. de Palma, G. Iaccarino, G. Pascazio, and M. Napolitano, “An immersed boundary method for compressible flows using local grid refinement”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 225, No. 2, 2007, pp. 2098-2117, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.03.008>.
  19. M. C. Lai, Y. H. Tseng, and H. Huang, “An immersed boundary method for interfacial flows with insoluble surfactant”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 15, 2008, pp. 7279-7293, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2008.04.014>.
  20. S. W. Su, M. C. Lai, and C. A. Lin, “An immersed boundary technique for simulating complex flows with rigid boundary”, *Computers & Fluids*, Vol. 36, No. 2, 2007, pp. 313-324, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2005.09.004>.
  21. R. O. Warrington Jr and G. Crupper Jr, “Natural convection heat transfer between cylindrical tube bundles and a cubical enclosure”, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 103, No. 1, 1981, pp. 103-107, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3244401>.