

금속수소화물 수소 저장 용기 내부의 수소흡장에 대한 수치해석적 연구

남진무*, 강경문*, 주현철*[†]

*인하대학교 기계공학과

Numerical Study of Hydrogen Absorption in a Metal Hydride Hydrogen Storage Vessel

JINMOO NAM*, KYUNGMIN KANG*, HYUNCHUL JU*[†]

*School of Mechanical Engineering, Inha University, 253 Yonghyun-dong,
Nam-gu, Incheon, 402-751, Korea

ABSTRACT

In this paper, a three-dimensional hydrogen absorption model is developed to precisely study hydrogen absorption reaction and resultant heat and mass transport phenomena in metal hydride hydrogen storage vessels. The 3D model is first experimentally validated against the temperature evolution data available in the literature. In addition to model validation, the detailed simulation results shows that at the initial absorption stage, the vessel temperature and H/M ratio distributions are uniform throughout the entire vessel, indicating that the hydrogen absorption is so efficient during the early hydriding process and thus local cooling effect is not influential. On the other hand, nonuniform distributions are predicted at the latter absorption stage, which is mainly due to different degrees of cooling between the vessel wall and core regions. This numerical study provides the fundamental understanding of detailed heat and mass transfer phenomena during hydrogen absorption process and further indicates that efficient design of storage vessel and cooling system is critical to achieve fast hydrogen charging and high hydrogen storage efficiency.

KEY WORDS : Hydrogen storage(수소저장), Metal hydride(금속수소화물), Hydrogen absorption(수소흡장), Numerical simulation(수치시뮬레이션), LaNi₅(란타넘니켈합금)

Nomenclature

C_a : rate constant, 1/s

c_p : specific heat, J/kg·K

E_a : activation energy, J/mol

H/M: hydrogen to metal atomic ratio

ΔH : reaction heat of formation, J/kg

h : heat transfer coefficient, W/m²·K

K : permeability, m²

k : thermal conductivity, W/m·K

M : molecular weight, kg/mol

[†]Corresponding author : hcju@inha.ac.kr

[접수일 : 2010.7.19 수정일 : 2010.8.4 게재확정일 : 2010.8.20]

- P : pressure, Pa
 R : universal gas constant, 8.314 J/mol·K
 T : temperature, K
 t : time, s
 \vec{u} : velocity vector, m/s

Greek letters

- ε : porosity
 μ : dynamic viscosity, kg/m·s
 ρ : density, kg/m³

Superscripts

- g : gas phase
 s : solid phase
 eff : effective value

Subscripts

- emp : empty
 eq : equilibrium
 in : inlet
 sat : saturation
 m : mass equation
 ref : reference value
 T : energy equation
 u : momentum equation
 w : wall
 0 : initial

1. 서 론

최근 수소 연료는 화석연료의 고갈과 환경오염을 해결할 수 있는 차세대 청정에너지원으로써 주목받고 있으며 이에 따라, 수소에너지에 대한 연구와 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 수소 연료는 단위 질량당 높은 에너지밀도를 지니고 있어, 연료전지용 연료와 같이 다양한 에너지원으로 사용할 수 있으며, 지구표면의 물로부터 대량생산이 가능하고, 사용 후에도 물로 환원되어지며, 사용에 따른 오염물질의 배출이 전혀 없기 때문에 친환경적 에너지라는 장점을 지니고 있다. 하지만, 수소는 반응에너

지가 매우 작고, 상온에서 반응속도가 매우 빠르며, 그리고 폭발의 위험성이 매우 높은 성질로 인하여 수소의 저장 효율 및 수송에 어려움이 따른다. 따라서 차세대 에너지원으로써 수소연료를 사용하기 위해서는 효율적인 저장 방법 및 수송기술 개발이 시급히 이루어져야 한다. 현재, 수소를 안정하게 저장·수송하는데 필요한 수소저장 방법들 중에서 금속수소화물(metal hydride)을 이용한 방법이 가장 주목 받고 있다. 이 방법은 기존의 단순 압축 및 액화를 이용한 방법에 비해 안전성, 용적당저장량, 장시간 저장 용이성, 고순도 수소를 방출한다는 측면에서 큰 장점을 지니고 있다^{1,2)}.

이러한 금속수소화물을 이용한 수소의 흡장(absorption) 및 탈장(desorption) 성능은 금속수소화물 용기의 열 및 물질전달 특성에 크게 영향을 받으므로, 금속수소화물 수소 저장 시스템의 소재, 디자인 및 작동변수들을 최적화 하는 기술이 확립되어야 한다. 즉 금속수소화물용기의 이론연구를 통한 해석 모델을 개발하여 성능을 예측하고 디자인 및 작동 변수의 영향성을 체계적으로 분석하는 과정이 반드시 필요하다. 이러한 이유로 현재까지 여러 형태의 금속수소화물용기 해석모델들이 개발되어 왔으며 시뮬레이션을 통한 용기내부의 반응 및 열/물질전달 주요 특성들이 발표되어왔다. Jemni³⁾등은 2차원 기하학적 형상의 수소저장용기를 사용하여 시간변화에 따라 온도, 압력, 수소화물 밀도 변화 예측과 시뮬레이션 결과를 토대로 저장용기 형상, 입구압력, 입구 온도 선택의 중요성을 강조하였다. Ben Nasrallah⁴⁾등은 흡·탈장 과정에서 LaNi₅ 용기내부 금속과 가스의 온도가 동일하다는 열평형(thermal equilibrium) 가정의 타당성을 인접한 수소가스와 금속의 온도를 각각 계산한 두온도모델(two temperature model)과 두 온도가 동일하다고 가정한 단일온도모델(one temperature model)의 시뮬레이션 결과들의 비교를 통해 입증하였다. 또한 용기내부 압력변화에 따른 최고온도 및 저장된 수소농도 변화 결과를 통해 용기내부의 압력변화 영향성은 무시될 수 있음을 보였으며 반응용기의 최고 온도 비교를 통해 흡장반응의 평형압력(equilibrium pressure)이 금속에 흡

장된 수소농도보다는 온도에 의해 크게 좌우된다는 사실을 입증하였다. Ram Gopal⁵⁾ 등은 수소저장용기 외부 냉각수의 온도변화에 따른 흡·탈장률을 실험적으로 측정하고 1차원 해석모델 시뮬레이션도 함께 수행하여 냉각수 영향성을 상세히 분석하였다. 흡장과정은 발열반응이므로 외부 냉각수의 온도가 낮아질수록 수소저장이 용이하고 반대로 탈장과정은 흡열반응이므로 냉각수의 온도가 높을수록 수소 방출 효율이 증가함을 보였다. Mohan⁶⁾ 등은 2차원 수소흡장해석모델을 여러 개의 원통형 냉각튜브와 금속수소화물필터들의 조합으로 구성된 실제적인 수소저장용기 디자인에 적용하여, 냉각튜브의 지름, 개수 등 여러 반응용기 설계인자와 수소저장효율과의 상관관계를 수치적으로 설명하였다. Kumar Phate⁷⁾ 등은 수소저장용기의 2차원 전산모사를 통해 용기 내부 축·방사 방향으로 각 위치에서의 온도, 저장된 수소농도 변화 및 용기의 공극율(porosity)이 작을수록 수소저장용기의 열전도도가 증가하여 저장용기 최고온도와 평균온도가 감소함을 보였다.

본 논문에서는 기존에 수행된 선행 연구들을 바탕으로, 수소 흡장 시 금속수소화물 수소저장용기 내부에서 일어나는 화학 반응, 열 및 물질전달 메커니즘 등을 고려해 수소저장용기 최적화연구에 사용될 수 있는 금속수소화물 3차원 수소흡장모델이 개발될 것이다. 개발된 모델은 기존에 측정된 실험결과들과 비교/분석을 통해 검증된 후 시뮬레이션을 통해 수소 흡장반응이 진행되는 동안 저장용기 내에서 발생하는 여러 가지 핵심 현상들에 대한 기본적인 지식을 독자들에게 제공할 것이다.

2. 금속수소화물 수소흡장 모델

본 연구에서 개발될 금속수소화물 수소흡장모델은 수소흡장반응과 반응으로 인한 열 및 물질 전달 과정을 포함한다. 본 모델을 개발하기 위해 사용된 가정들은 다음과 같다:

- ① 수소는 이상기체임.
- ② 수소흡장금속용기는 동종 다공성 미디어로 가정함.

- ③ 금속수소화물과 기체 수소기체 사이에는 국부적 온도평형 존재함.
- ④ 흡장반응 평형압력은 온도만의 함수로 가정함
- ⑤ 수소흡장에 기인한 금속의 부피팽창은 무시함. 그러므로 금속의 다공도 및 기체투과도(gas permeability)는 수소흡장농도와 무관함. 또한 금속의 열전도도도 수소흡장농도와 무관하다고 가정함.

2.1 지배방정식 및 생성항

본 모델은 질량(mass), 모멘텀(momentum), 열에너지(thermal energy)의 보존법칙에 의해 표현되었다. 지배방정식을 정리하면 다음과 같다.

질량 보존식:

수소:

$$\frac{\partial \epsilon \rho^g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^g \vec{u}) = -S_m \quad (1)$$

금속:

$$(1 - \epsilon) \frac{\partial \rho^s}{\partial t} = S_m \quad (2)$$

거기서 ϵ 은 공극율을 나타내며, S_m 은 흡장반응이 일어남으로써 생기는 시간 변화에 따른 수소의 질량변화를 표현하는 생성항으로 흡장반응에서는 양의 값을, 탈장반응에서는 음의 값을 가지게 된다. 흡장반응에서의 S_m 은 다음과 같이 표현된다⁸⁾.

$$S_m = C_a \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \ln\left(\frac{P^g}{P_{eq}^s}\right) (\rho_{sat}^s - \rho^s) \quad (3)$$

거기서 C_a 와 E_a 는 각각 흡장반응에 대한 반응계수, 활성화 에너지, ρ_{sat}^s 는 다공성금속에 수소가 포화상태로 저장되었을 때의 베드 밀도, P_{eq} 는 평형압력을 나타낸다.

평형압력은 Van't Hoff relationship에 의해 결정되었다. Ben Nasrallah⁴⁾ 등은 흡장과정에서 저장된 수소의 농도는 평형압력 계산시 무시될 수 있다는 결론을 내었으며 평형압력은 다음과 같이 나타낼

수 있다.

$$P_{eq} = P_{ref} \exp\left(A - \frac{B}{T}\right) \quad (4)$$

수소가 금속에 흡착되는 반응은 발열반응이므로 반응이 진행됨에 따라 온도상승을 동반하게 되며 이에 따라 평형압력 또한 증가한다. 수소의 압력보다 평형압력이 크면 흡장반응은 더 이상 일어나지 않으며 냉각효과로 인해 온도가 하락하면 평형압력이 낮아지면서 흡장반응이 일어난다. 이와 같은 반응이 반복적으로 일어나면서 금속에 흡착되는 수소가 포화상태에 도달하게 되는 것이다.

모멘텀 보존식:

$$\frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial \rho^g \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \cdot (\rho^g \vec{u} \vec{u}) \right] = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + S_u + \rho^g \vec{g} \quad (5)$$

생성항 S_u 는 Darcy's forces로 나타내어지며 아래와 같이 표현된다.

$$S_u = -\left(\frac{\mu}{K}\right) \vec{u} \quad (6)$$

거기서 μ 는 동점성계수, K 는 투과도를 의미한다.

에너지 보존식:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{c}_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^g \bar{c}_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) + S_T \quad (7)$$

거기서 $\bar{\rho} \bar{c}_p$ 와 k^{eff} 는 공극율에 대한 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\rho} \bar{c}_p = (1 - \varepsilon) \rho^s c_p^s + \varepsilon \rho^g c_p^g \quad (8)$$

$$k^{eff} = (1 - \varepsilon) k^s + \varepsilon k^g \quad (9)$$

비열 c_p 와 열전도도 k 는 상수로 가정하고 기체 밀도인 ρ^g 는 이상기체 방정식을 적용하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$\rho^g = \frac{P^g M^g}{RT} \quad (10)$$

공극율을 갖는 금속에서의 에너지 생성항은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$S_T = S_m [\Delta H - T(c_p^g - c_p^s)] \quad (11)$$

거기서 ΔH 는 금속과 수소의 반응간 엔탈피생성을 의미하며 S_T 는 S_m 의 함수로서 온도의 증감은 수소와 금속의 반응속도에 의존한다.

2.2 초기/경계 조건 및 모델 구현

온도, 압력, 다공성 금속 밀도의 초기조건은 다음과 같이 가정하였다.

$$T = T_0, \quad P = P_0, \quad \rho^s = \rho_{emp}^s \quad (12)$$

용기 내부와 벽면의 냉각효과에 의한 열전달은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-k^{eff} \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_w) \quad (13)$$

지금까지 기술된 금속수소화물 수소흡장모델은 상용 Star-CD 전산유체(computational fluid dynamics, CFD) 패키지를 이용하여 실행되었으며, 질량, 모멘텀 및 에너지 보존식과 이와 관련된 생성항들은 유저코드(user code) 기능을 이용해 코드화 되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 개발된 수소흡장모델은 LaNi_5 합금 소재 수소 저장용기에 적용되어 수소흡장반응 시 용기 내부의 열 및 물질전달 특성 연구를 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

LaNi_5 금속 용기에 수소가 흡장되는 화학반응식은 다음과 같이 표현된다.

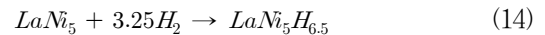


Table 1 Geometrical, physical, and operating parameters

Description	Value
Initial/ inlet temperature, T_0/T_{in}	20/20°C
Inlet pressure, P_{in}	10 bar
Absorption rate constant, C_a	59.187 s ⁻¹
Activation energy, E_a	21179.6 J/mol
Specific heat of hydrogen gas, c_p^g	14.890 kJ/mol·K
Specific heat of the metal, c_p^s	0.419 kJ/mol·K
Thermal conductivity of the hydrogen gas, k_g	0.167 W/m·K
Thermal conductivity of the metal, k_s	3.18 W/m·K
Porosity of the metal, ϵ	0.63
Permeability of the metal, K	10 ⁻⁸ m ²
Heat transfer coefficient, h	1652 W/m ² ·K
Wall temperature for cooling, T_w	20°C
Hydrogen-free metal density, ρ_{emp}^s	5300 kg/m ³
Saturated metal density, ρ_{sat}^s	5369 kg/m ³
Reference pressure, P_{ref}	10 bar ⁹⁾
Constant A in the eq.(4)	10.700 ⁹⁾
Constant B in the eq.(4)	3704.6 ⁹⁾

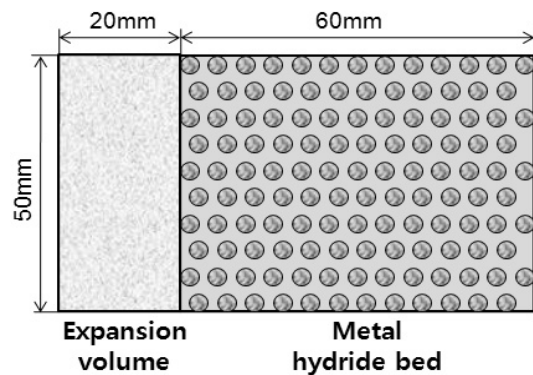
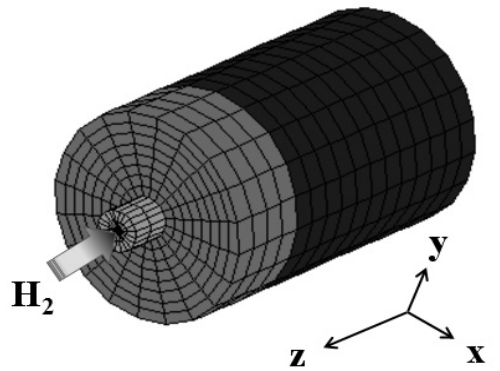


Fig. 1 Computational domain and schematic diagram of the cylindrical LaNi₅ hydrogen storage tank.

본 연구에서 사용된 LaNi₅ 수소저장용기의 기하학적 형상 및 치수(dimension)는 Fig. 1에 나타나 있다. 흡장 반응이 진행되는 동안 수소는 용기 내부로 일정한 압력으로 주입되고 공극율을 갖는 금속 파우더(powder)로 구성된 용기에서 화학반응에 의해 저장된다. 본 연구에서 사용된 열-물질의 프라퍼티(property)들과 작동 조건은 Table 1에 나열되어 있다.

Fig. 2는 Jemni¹⁰⁾등이 LaNi₅ 수소저장용기의 세 개의 각각 다른 위치(A, B, C)에서 실험적으로 측정 한 온도변화곡선을 본 연구에서 개발된 수치 모델을 이용하여 계산된 시뮬레이션 결과와 비교한 그림이다. 실험장치 구성에 대한 자세한 내용은 참고 논문 10)에 나타나 있다. 실험 및 시뮬레이션에서 금속용기의 초기온도와 외부온도는 모두 20°C이므로, Fig. 2에서 보여지는 것처럼, 실험 및 시뮬레이션 초기의 온도의 급격한 증가는 용기내 수소 흡장 반응에 의한 열생성물이 대류 및 전도에 의한 외부

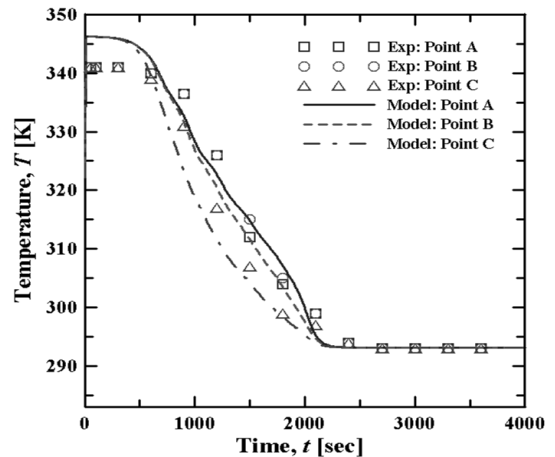


Fig. 2 Comparison between measured (symbols) and calculated (lines) temperature evolution profiles at three different locations: Point A (r = 15 mm, z = 35 mm), Point B (r = 15 mm, z = 25 mm), Point C (r = 15 mm, z = 15 mm).

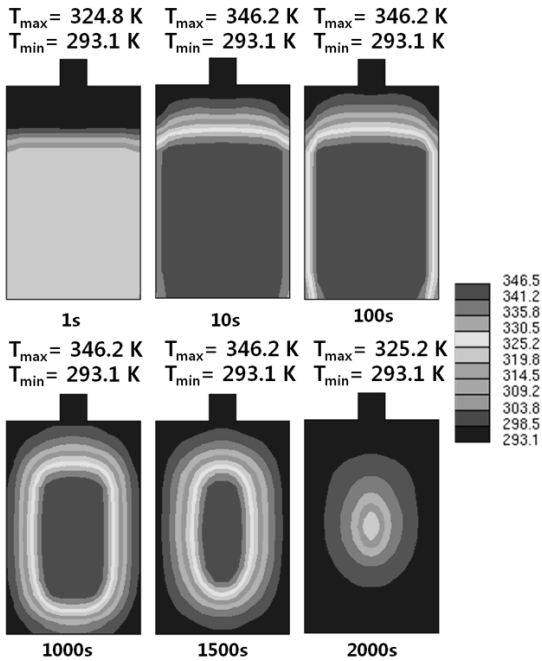


Fig. 3 Temperature contours in a cross-section of the hydrogen storage tank at 1s, 10s, 100s, 1000s, 1500s, and 2000s.

로의 열배출률보다 크다는 사실을 나타낸다. 하지만 수소충전이 계속 진행되면서 수소흡장률이 낮아지므로 용기의 온도는 서서히 감소하는 경향을 실험 및 시뮬레이션 온도변화곡선에서 볼 수 있다. 전반적으로 시뮬레이션을 통해 계산된 온도변화곡선은 실험데이터와 근사한 결과를 나타내며 이는 본 수소흡장모델의 정확성을 입증해준다.

Fig. 3는 LaNi₅ 수소저장용기의 수소충전 시간 경과에 따른 용기내부 온도 분포를 나타낸다. 1~10초 결과를 보면, 반응 초기 용기 내부 전면에 걸쳐 균일한 온도분포를 나타내고 빠른 반응속도로 인해 최고온도가 346.2K까지, 다시 말해 초기온도에 비해 50℃이상까지 급격하게 상승한 것을 볼 수 있다. 이는 반응 초기에는 용기 내부의 온도가 낮아 수소흡장평형압력이 낮을 뿐 아니라 흡장 반응이 일어날 수 있는 금속의 반응면적이 충분하기 때문이다. 100초의 경우, 용기벽면의 온도가 서서히 감소하는 경향이 보이는데 이는 계속적인 수소충전에 따른 금속 반응면적이 감소하여 외부의 냉각효과보다 반

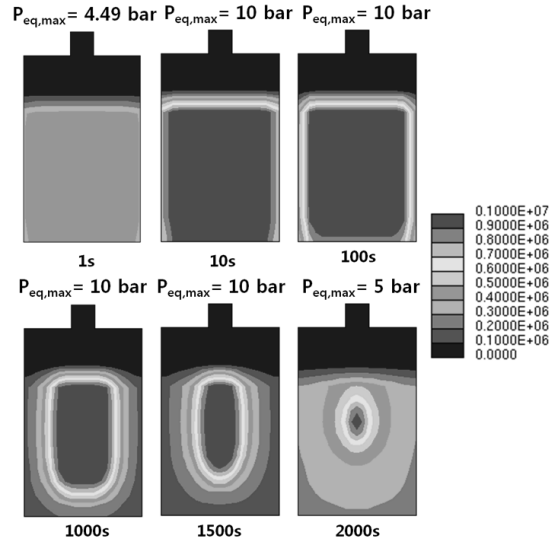


Fig. 4 Equilibrium pressure contours in a cross-section of the hydrogen storage tank at 1s, 10s, 100s, 1000s, 1500s, and 2000s.

응열 생성율이 적다는 사실에 기인한다. 1000초의 경우를 보면 용기내부의 온도분포의 불균일 정도가 커져 용기 벽면 부근의 온도가 중심부의 온도에 비해 50℃이상 낮다. 이는 용기외부의 냉각효과 때문에 반응 초기 단계에 용기벽면에서부터 반응이 빠르게 일어나고 이로 인해 벽면 부근의 금속수소화물은 거의 포화상태에 도달했음을 암시한다. 2000초의 경우, 높은 온도 분포는 용기 중심부의 작은 부분에만 존재하며 이러한 사실은 용기 중심부에서는 여전히 흡장반응이 진행되고 있음을 말해 준다.

Fig. 4는 시간 경과에 따른 평형압력의 분포를 나타낸다. 평형압력은 앞서 Van't Hoff relationship에 의해 온도만의 함수로 가정하였기 때문에(식 (4) 참조) 온도분포와 유사하게 나타난다. 반응 초기의 급격한 온도 상승으로 인해 평형압력 역시 용기내부 전면에 걸쳐 고른 분포와 급격한 압력상승을 동반한다. 시간이 경과함에 따라 용기 중심부에서 벽면 방향으로 냉각효과로 인한 온도 감소에 기인하여 평형압력 또한 서서히 감소하는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 5은 시간 경과에 따라 금속 분자에 흡장된 수소 원자의 비율(H/M atomic ratio)을 나타낸 결

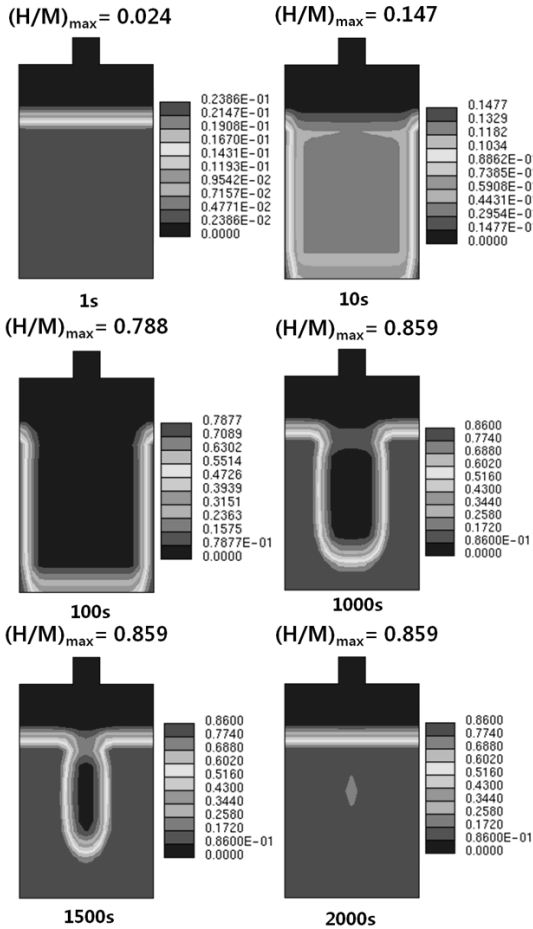


Fig. 5 The (H/M) ratio contours in a cross-section of the hydrogen storage tank at 1s, 10s, 100s, 1000s, 1500s, and 2000s.

과이다. 금속 분자에 흡장된 수소 원자의 비율은 다음과 같이 계산되며 식 (14)에 나타난 것과 같이 LaNi_5 1몰당 6.5개의 수소원자가 흡착된 상태를 포화상태라 정의한다.

$$H/M \text{ atomic ratio} = \frac{\rho^g / 3.25M^g}{\rho_{emp}^s / M^s} \quad (15)$$

Fig. 5를 보면 반응초기의 경우(1초) 용기 내부 전면에 걸쳐 균일하게 흡장반응이 일어나지만 시간이 경과함에 따라 냉각효과로 인해 용기 벽면에서 수소 흡장이 더 활발히 일어남을 알 수 있다. 1000초

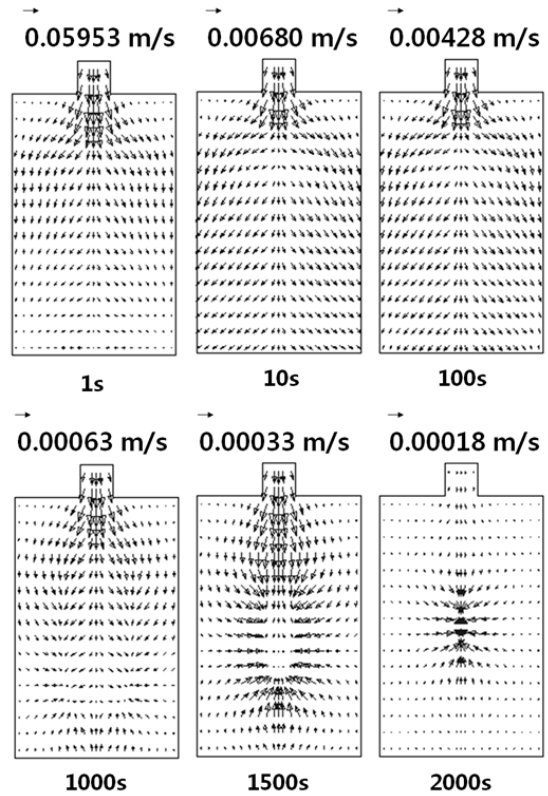


Fig. 6 The velocity distributions in a cross-section of the hydrogen storage tank at 1s, 10s, 100s, 1000s, 1500s, and 2000s.

에서는 벽면부근의 H/M 비율이 거의 포화상태에 도달한 것을 볼 수 있으며, 2000초에 도달하면 용기 벽면에 비해 상대적으로 냉각효율이 떨어지는 용기 중심부 아주 작은 부분만이 비포화 상태로 남아있는 것을 확인 할 수 있다.

수소충전시간에 따른 용기내부의 수소가스 속도 분포가 Fig. 6에 나타나 있다. 식 (1)의 수소가스 질량보존식은 용기내부의 다공성금속 내부 수소가스 속도크기는 흡장반응속도가 커질수록 증가해야함을 암시한다. 그러므로 Fig. 6의 속도분포도는 수소충전 초기 단계에서는 속도크기가 큰 반면, 시간이 흐름에 따라 속도크기가 점차적으로 감소하는 경향을 보여주며, 이러한 경향은 Fig. 5의 H/M비율 분포경향과도 일치함을 알 수 있다. 또한 수소가스 속

도방향을 주목해 보면, 수소가스는 용기내부로 유입된 후 금속에 흡장되는 지점을 향해 흐른다는 사실을 알 수 있다. 결과적으로, 100초까지는 수소가스가 입구에서 용기 벽면을 향해 흘러들어 가지만, 1000~2000초 동안은 수소가스가 서서히 용기 중심부를 향해 흐르는 것을 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수소흡장반응이 일어나는 동안 금속수소화물 용기내부의 열 및 물질전달 특성을 연구하기 위해 3차원 해석모델을 개발하였다. 본 모델에는 질량, 모멘텀, 에너지 보존식이 적용되었으며 평형압력은 온도만의 함수로 가정하였다. 개발된 수소흡장 3차원 모델은 원통형 LaNi_5 수소저장용기에 적용되어 실제 측정된 실험데이터와 비교를 통해 그 정확성이 입증되었다. 또한 수소흡장반응이 진행되는 동안 온도, 평형압력, 저장된 수소흡장률(H/M 비율), 그리고 수소가스속도 분포 결과를 상세히 보여줌으로써 LaNi_5 용기에 수소충전 시 발생하는 주요 물리/화학적 현상들을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 발견된 핵심내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 수소흡장반응 초기단계에는 용기 내부 전면에 걸쳐 균일하게 반응이 일어나는 반면 시간이 지나면서 냉각효과차이에 기인하여 용기의 벽면에서 수소흡장률이 높아진다. 결과적으로 용기내부에서 온도 및 수소흡장률의 불균일도는 수소충전 시간이 지남에 따라 점점 커지게 된다.
- 2) 결과적으로 용기 벽면의 경우는 1000초 이내에서 수소흡장률이 포화상태에 도달하지만 냉각효율이 떨어지는 용기 중심부는 2000초 이상 경과한 후에도 포화상태에 도달하지 못하였다.
- 3) 이러한 사실은 금속수소화물 반응용기의 크기 및 냉각채널 디자인이 수소저장효율, 수소충전 시간, 단위무게당 수소저장량 등을 결정짓는 중요한 요소이며 금속수소화물 반응용기 모델개발 및 시뮬레이션을 통한 디자인 최적화가 반드시 필요하다는 사실을 입증해준다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소 국제공동연구사업분야(계약번호 UD090080GD)를 통해 지원받아 수행된 연구입니다. 수소흡장 수치모델 시뮬레이션에 필요한 기술적인 부분은 CD-Adapco Korea를 통해 지원받았습니다.

참 고 문 헌

- 1) 노순영, 이영우, 강경석, 최상진, 김종욱, “수소저장 기술특성 및 특허분석에 의한 기술동향”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 19, No. 1, 2008, pp. 90-102.
- 2) 심규성, 한상도, 김종원, 명광식, “수소저항합금을 사용한 열저장 및 이용시스템 연구”, 태양에너지, Vol. 18, No. 3, 1998, pp. 169-175.
- 3) A. Jemni and S. Ben Nasrallah, “Study of two-dimensional heat and mass transfer during absorption in a metal-hydrogen reactor”, Int. J. Hydrogen Energ., Vol. 20, No. 1, 1995, pp. 43-52.
- 4) S. Ben Nasrallah and A. Jemni, “Heat and mass transfer models in metal-hydrogen reactor”, Int. J. Hydrogen Energ., Vol. 22, No. 1, 1997, pp. 67-76.
- 5) M. Ram Gopal and S. Srinivasa Murthy, “Studies on heat and mass transfer in metal hydride beds”, Int. J. Hydrogen Energ., Vol. 20, No. 1, 1995, pp. 911-917.
- 6) G. Mohan, M. Prakash Maiya and S. Srinivasa Murthy, “Performance simulation of metal hydride hydrogen storage device with embedded filters and heat exchanger tubes”, Int. J. Hydrogen Energ., Vol. 32, 2007, pp. 4978-4987.
- 7) A. Kumar phate, M. Prakash Maiya and S. Srinivasa Murthy, “Simulation of transient heat and mass transfer during hydrogen sorption in cylindrical metal hydride beds”, Int. J. Hydrogen

- Energ., Vol. 32, 2007, pp. 1969-1981.
- 8) U. Mayer, M. Groll and W. Supper, "Heat and mass transfer in metal hydride reaction beds: Experimental and theoretical results", J. Less-Comm. Met., Vol. 131, 1987, pp. 235-244.
- 9) C. A. Chung and C. J. Ho, "Thermal-fluid behavior of the hydriding and dehydriding processes in a metal hydride hydrogen storage canister", Int. J. Hydrogen Energ., Vol. 34, 2009, pp. 4351-4364.
- 10) A. Jemni, S. Ben Nasrallah and J. Lamloumi, "Experimental and theoretical study of a metal-hydrogen reactor", Int. J. Hydrogen Energ., Vol. 24, 1999, pp. 631-644.