

도시가스 수직 배관 내 정지된 수소-메탄 혼합가스의 성층화 현상 연구

김태균* · 조정민** · 성재용†

A Study on Stratification Phenomena of Still Hydrogen-Methane Gas Mixture in a Vertical Urban Gas Pipe

Tae Kyun Kim*, Jung Min Cho** and Jaeyong Sung†

Abstract The stratification phenomena of still hydrogen (20%) and methane (80%) gas mixture in a vertical urban gas pipe have been investigated by simulating the flows based on a mixture model. The stratification is accompanied with the natural convection by the buoyancy force. The hydrogen volume fraction in the upper sections of the pipe increases with time but the increasing rate gets smaller due to the weaker buoyancy force. The pipe with a smaller diameter exhibits a higher peak of hydrogen concentration. The size of vortices is proportional to the pipe diameter. The slip velocity between hydrogen and methane oscillates with a large amplitude at the earlier stage of stratification and then the amplitude decreases sharply. The slip velocity decreases with the diameter, making the stratification become slower. The length of pipe does not affect the stratification since the pipe is sufficiently long relative to the size of vortices.

Key Words : Hydrogen-Methane Gas Mixture(수소-메탄 혼합가스), Stratification(성층화), Volume Fraction(체적분율), Urban Gas(도시가스), CFD(전산유체해석)

1. 서론

오늘날 주요 에너지원으로 사용되는 화석연료는 연소 후에 CO₂, NO_x 등의 가스들이 배출이 되는데 이 가스들은 환경오염이나 온실효과를 일으키는 주요 원인으로 알려져 있다. 현재 이를 저감시키기 위해서 세계적으로 탄소중립

정책과 친환경 에너지 기술개발 등을 목적으로 기존의 LNG와 같은 화석연료에 수소를 혼입하여 탄소를 저감하려는 노력을 하고 있다^(1,2).

수소는 높은 발열량과 넓은 가연한계 그리고 낮은 점화 에너지의 연소특성을 가지고 있는데, 연소 후에 생성물이 대부분 수증기인 청정물질로 발생하기 때문에 대체 에너지원으로 많은 기대를 가지고 있다⁽³⁾. 미국 및 EU(유럽연합)의 경우 수소를 혼입한 도시가스의 이산화탄소 배출량 저감에 대한 연구결과^(4,5)를 바탕으로 도시가스 인프라를 활용한 수소전환 프로젝트 (Energy Earthshots Initiative) 가 활발하게 진행중이며, 실

† SeoulTech, Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Professor

E-mail: jysung@seoultech.ac.kr

* SeoulTech, Graduate School, Graduate Student

** SeoulTech, Graduate School, Ph.D Student

제 실험결과에서도 대기 중으로 방출되는 이산화탄소가 감소되었다고 보고되었다⁶⁾. 이러한 수소가스의 혼입에 대한 상용화가 추진되고 있으나, 기존 도시가스 공급 시스템에 적용하기에는 수소 혼입가스의 대한 유동이나 연소특성 및 안전성 평가 같은 분석이 미흡한 상태이다. 특히 공기중에 수소가 4~75% 정도의 농도를 형성하는 경우 폭발성을 나타내기 때문에 수소가스를 취급하는 시스템은 폭발이나 화재, 부식 등 안전성 분석을 위한 연구도 주요 관심사이다^{7,9)}.

수소혼입 도시가스 시스템에서 밀도가 다른 혼합가스가 장시간 배관 안에 체류하여 수소가 성층화가 된다면 연소과정에서 폭발이나 역화의 위험이 있다. 그러므로 안전한 수소혼입 도시가스 공급 시스템을 구축하기 위해서는 공급 배관 내 수소의 성층화, 수소혼입 가스의 연소, 수소 누출에 따른 확산에 대한 연구가 필요하다. Liu 등¹⁰⁾은 실험과 전산유체역학(CFD) 해석을 통해 저장 탱크와 수평 배관 내 성층화 특성에 대해 연구를 수행했다. Ren과Zhang¹¹⁾, Boulaahlib와 Medaerts¹²⁾는 수소가 혼입된 도시가스를 연료로 하는 가스레인지나 보일러에 대해 수소 농도에 따른 연소 현상에 대한 연구를 수행하였다. Marangon와 Carcassi¹³⁾는 수소-메탄 혼합물의 비정상 확산 및 성층화 특성에 대해 실험적으로 고찰하였고, Vudumu와 Koylu¹⁴⁾는 챔버 내에서 고농도 수소가 공기 중으로 확산되는 비정상 유동 시뮬레이션을 통해 폭발 화염의 발생가능성에 대해 논의하였다.

최근 국내에서도 탄소저감을 위해 기존의 도시가스 배관에 강제로 수소를 20% 혼입하여 공급하는 방안을 추진 중이다. 아파트 위주의 국내 주거환경에서는 도시가스 배관이 고층의 수직 형태가 대부분이며, 장기간 미사용 중인 수직 배관 내부의 수소 성층화에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 수소가 혼입된 도시가스의 수직 배관 내 혼합가스의 성층화 특성을 고찰하고자 한다. 도시가스는 메탄이 95%를 차지하고 있으므로 도시가스는 메탄으로 가정한다. 가늘고 긴 수직 배관에서의 수소-메탄 혼합가스의 유동에 대해 CFD해석을 수행하고, 비정상

성층화 유동현상을 수소의 농도, 압력, 유속 변화를 통해 고찰한다. 또한 배관의 직경 및 길이에 따른 성층화 특성에 대해 논의한다.

2. 수직 가스 배관의 형상 및 해석 방법

2.1 수직 가스 배관의 형상

본 연구에서 사용한 수직 배관은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 직경 D , 길이 L 의 직선 배관으로 수소-메탄 혼합가스가 내부에 정지된 상태로 존재한다. 여름철 도시가스를 사용하지 않을 때 밸브가 잠겨 있으므로 입출구가 막혀있고 유체 흐름이 없는 것으로 가정하였다. 수직 배관에 채워진 혼합가스는 시간이 지나면서 점차 성층화되는 현상이 일어난다. 수직 배관의 기본 형상은 직경 1 인치(25.4 mm), 길이 25 m(아파트 평균 10층 높이)를 사용하였다.

수치해석 기법은 Table 1에 정리하였으며, 정지된 가스의 성층화 유동이므로 3차원 압축성 비정상 층류 유동으로 가정하였다. 혼합가스는 수소 20%, 메탄 80%의 체적비를 가지고 있으며, 배관 내부는 상온(300K), 1기압(101,325 Pa) 조건으로 설정하였다. 혼합가스 유동에 대한 지배방정식은 Mixture model^{10,14)}에 기반한 다상 유동 해석기법을 적용하였으며, 지배방정식은 다음과 같다.

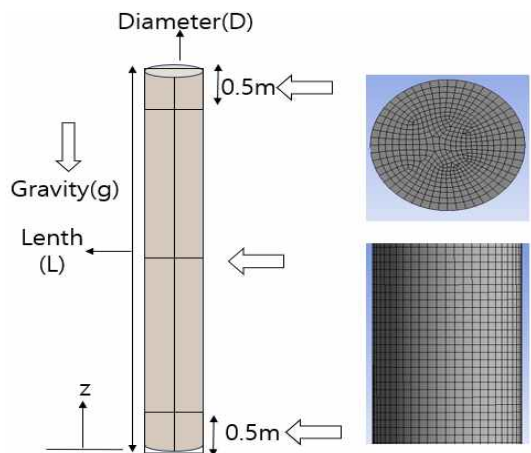


Fig. 1. The shape of a vertical gas pipe.

Table 1. Simulation method and conditions

Category	Parameters
Model	Mixture model (Multiphase flow)
Flow condition	3D, Compressible, Transient, Laminar
Solution method	SIMPLE, body force weighted
Fluids	H ₂ : 20%, CH ₄ : 80%
Pressure	101,325 Pa
Temperature	300K

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = & -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] \\ & + \rho_m \vec{g} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

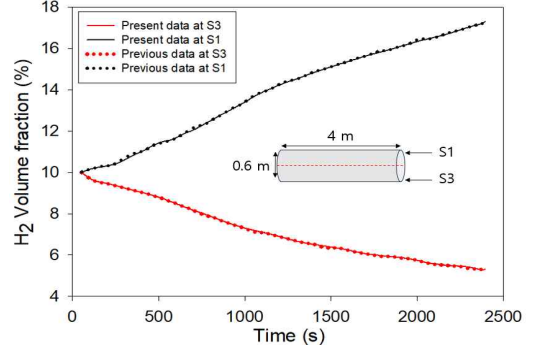
$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k}) \quad (3)$$

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (4)$$

식(1)은 연속방정식, 식(2)는 운동량방정식, 식(3)은 체적분율방정식(volume fraction equation)이다. 여기서 ρ , v , p , μ , α 는 각각 밀도, 속도, 압력, 점도, 체적분율을 나타낸다. 하첨자 m 은 혼합가스의 물리량이며, 하첨자 k 는 개별가스의 물리량을 의미한다. n 은 개별가스의 총개수이며, 본 연구에서는 수소와 메탄의 혼합물이므로 $n = 2$ 이다. 연속방정식과 운동량방정식은 혼합가스의 유동을 지배하는 방정식이며, 체적분율방정식은 개별가스에 대한 연속방정식으로서 우변의 drift velocity에 의해 영향을 받는다. 식(4)의 drift velocity는 혼합가스에서 특정 기체가 중력이나 압력, 열 등에 의해 혼합가스와 다르게 움직일 때 혼합가스 속도에 대한 특정 기체의 상대 속도를 의미한다. 혼합가스의 물리량과 개별가스의 물리량은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k, \quad \vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m}, \quad \mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

차분화 해석기법은 SIMPLE 알고리즘을 적용

**Fig. 2.** Validation of the present simulation method by comparing H₂ volume fraction with previous data.

하였고, 중력이나 부력에 의한 body force의 영향을 고려하기 위해 Body force weighted 기법을 사용하였다. 이는 밀도 차이에 의해 발생하는 자연대류 현상이나 중력에 의한 층분리 현상을 분석할 때 주로 사용된다.

본 연구의 해석기법을 검증하기 위하여 Fig. 2에서 시간에 따른 수소의 체적분율(volume fraction) 변화를 기존연구⁹⁾ 결과와 비교하였다. 기존연구는 1 MPa의 압력으로 밀폐된 수평관(직경 0.6 m, 길이 4 m)에 수소 10%, 메탄 90%로 채워진 혼합가스가 시간이 지남에 따라 성층화가 일어나는 현상을 고찰하였다. 본 해석기법을 동일한 조건에서 시뮬레이션하고 수평 배관의 상부(S1)과 하부(S3) 지점에서의 수소 농도 변화를 기존 연구 데이터와 비교하였는데, 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간에 따른 성층화 변화 분석

Fig. 3은 직경 25.4 mm, 길이 25 m인 수직배관에서의 수소 성층화 과정을 시간에 따라 나타낸 그림이다. 배관 상부 0.5 m, 하부 0.5 m 영역에서 1~7일이 지난 후 수소의 농도(체적분율) 변화를 비교하였다. 시간이 지남에 따라서 상부는 점점 수소 농도가 짙어지고, 하부는 반대로 수소 농도가 점점 얇아지고 있음을 확인할 수 있다.

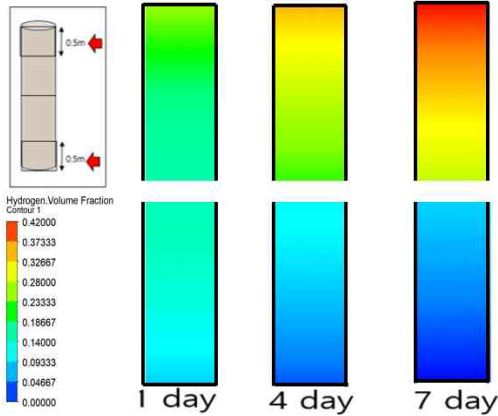


Fig. 3. Hydrogen stratification proceed during 7 days. ($L = 25$ m, $D = 25.4$ mm)

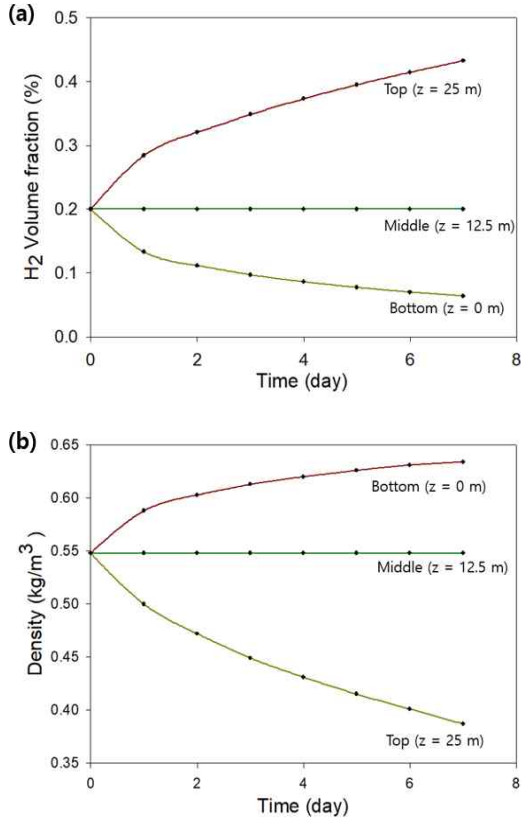


Fig. 4. Variations of the hydrogen volume fraction and the density of the gas mixture in the top, middle and bottom of the vertical pipe. (a) Hydrogen volume fraction and (b) density of the gas mixture.

Fig. 4(a)는 7일의 시간이 흐르는 동안 배관의 최하단, 최상단, 중앙 부분에서의 수소 농도 변화를 나타낸 그래프이다. 시간이 지남에 따라 수소의 농도가 상단부에서 점점 증가하고 하단부는 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 여기서 흥미로운 것은 상단부 수소의 농도 증가량이 하단부 수소 농도 감소량보다 많다는 점이다. 초기에 수소 농도가 상하부 모두 균일한 상태에서 중력에 의한 부력 효과로 가벼운 수소가 상승하고 무거운 메탄이 하강하는데, 이 때 상호 교환되는 체적유량은 일정하다. 수소와 메탄의 기체상수는 각각 $4.124 \text{ kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$, $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 로 메탄의 기체상수가 수소의 약 2배이다. 이는 동일한 압력과 온도에서 수소의 비체적이 메탄에 비해 1/2로 작다는 것을 의미한다. 따라서 동일한 체적유량으로 자연대류가 일어난다면 상승하는 수소의 질량이 하강하는 메탄의 질량보다 약 2배 많게 된다. 그 결과 상단부의 수소 농도 증가량이 하단부의 수소 농도 감소량보다 2배 크게 된다. 또한 시간이 지남에 따라 상단부의 수소 농도 증가율이 점점 줄어드는데, 이는 상단부의 수소 농도가 높아지면서 부력에 의한 힘이 줄어들기 때문이다.

Fig. 4(b)는 시간이 흐르는 동안 배관의 최상단과 최하단의 혼합가스 밀도 변화를 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 상단부는 밀도가 점점 낮아지고 하단부는 밀도가 점점 높아지고 있는데, 상단부 혼합가스 밀도 감소량이 하단부 밀도 증가량보다 약 2배 더 큰 것을 알 수 있다. 상온 대기압에서 수소 20%와 메탄 80%가 혼합된 가스의 밀도는 약 $0.548\text{kg}/\text{m}^3$ 이며, 수소와 메탄의 밀도는 각각 $0.0819\text{kg}/\text{m}^3$, $0.6679\text{kg}/\text{m}^3$ 로서 메탄의 밀도가 수소보다 약 8배 크다. 앞에서 설명한 바와 같이 상승하는 수소의 질량이 2배이고, 상단부 수소 농도 증가량이 2배이나 수소의 밀도가 메탄보다 1/8이므로 혼합가스 전체의 밀도는 상단부 감소량이 하단부 증가량보다 2배 많게 된다.

Fig. 5는 배관 중심의 수직 방향 길이에 따른 수소 농도를 나타낸 그래프이다. $z = 0$ 은 바닥면이고 z 가 증가할수록 수직 배관의 상부로 이동

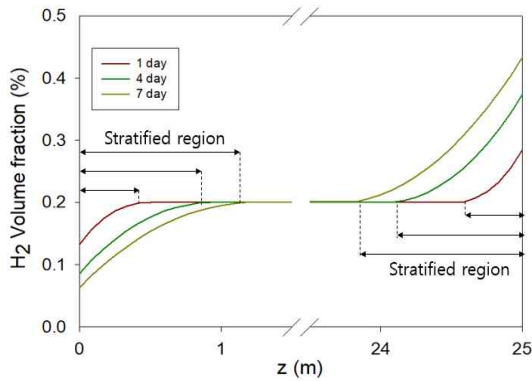


Fig. 5. Distribution of the hydrogen volume fraction along the pipe length.

하는 방향이다. 1~7일 간의 변화를 비교하였으며, 시간이 지날수록 성층화 영역이 확대되어 감을 볼 수 있다. 그러나 성층화 영역의 확대는 7일이 지나더라도 1일이 지났을 때에 비해 2배 정도밖에 되지 않는다. 상단부 수소 농도 증가율이 시간이 지남에 따라 감소하듯이 성층화 영역이 확대되는 정도도 시간이 지날수록 줄어들며 성층화가 완료되는 데는 매우 오랜 시간이 소요됨을 예상할 있다.

Fig. 6은 배관의 수직 길이 방향 압력 분포를 시간에 따라 비교하였다. Fig. 6(a)는 압력변화가 심한 상단부와 하단부 0.15 m에서의 분포도를 보여주고 있으며, 시간이 흐름에 따라 상단부와 하단부의 압력이 증가하고 중앙부는 압력이 감소함을 보인다. 이를 수치적으로 정확히 보기 위해 Fig. 6(b)에서 배관 중심을 따른 압력 분포 곡선을 시간에 대해 비교하였다. z 가 증가할수록 수직 방향 높이가 증가하며 하단부에서 상단부로 갈수록 압력이 선형적으로 감소하는 모습을 볼 수 있다. 초기 시간에는 상단부와 하단부의 압력 차이가 작으나 시간이 지남에 따라 압력 차이도 커지고 배관 내부의 절대적인 압력 값도 낮아진다. 다만, 배관 상단부와 하단부에서는 압력이 배관 내부보다 높게 나타나며, 이를 자세히 보기 위해 Fig. 6(b)에 확대된 그림을 삽입하였다. 이 그림에서 시간이 지나면서 내부 압력은 떨어지나 배관 상단과 하단의 벽면 압력은 미세하게 증가하는 형상을 보인다. 앞에서 설명

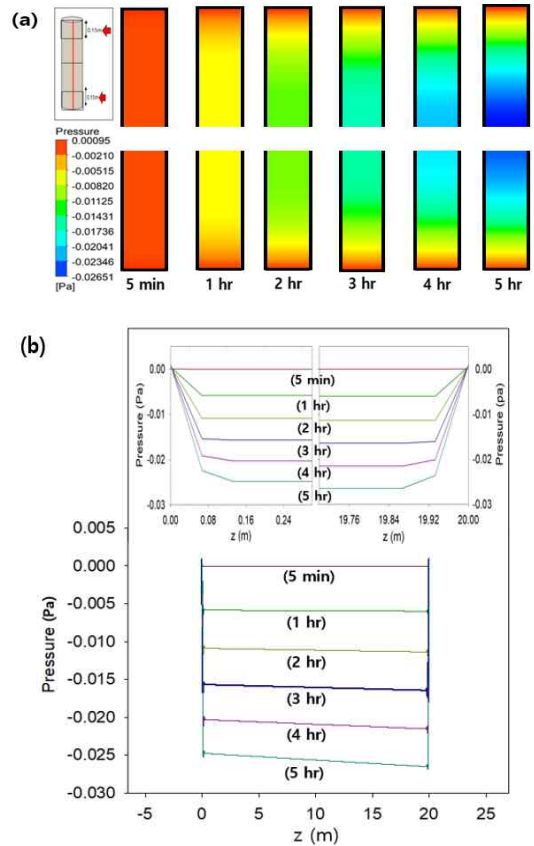


Fig. 6. Variations of pressure contours and pressure distribution along the pipe length during 5 hours. (a) Pressure contours and (b) pressure distribution along the pipe length.

한 바와 같이 성층화가 수직 배관의 상단부와 하단부에서 먼저 진행되며 그 과정에서 상단부와 하단부의 압력이 배관 내부보다 높게 형성된다. 성층화 과정에서 수소와 메탄의 이동 속도가 활발하고 상단과 하단의 벽면에서는 정체압(stagnation pressure)이 형성되어 내부보다 높은 압력이 형성되는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 배관 상단부의 시간에 따른 속도장을 수소와 메탄에 대해 비교하였다. 배관 상단부 0.15m 영역에서의 속도장 변화를 보여주고 있으며, $z = 19.9$ m (상단 벽면에서 0.1 m 지점) 위치의 수평 단면에서 z 방향 속도 contour도 비교하였다. 전체적으로 수소와 메탄의 속도 차이는 크지 않다. 성층화는 상단부에서 진행되며

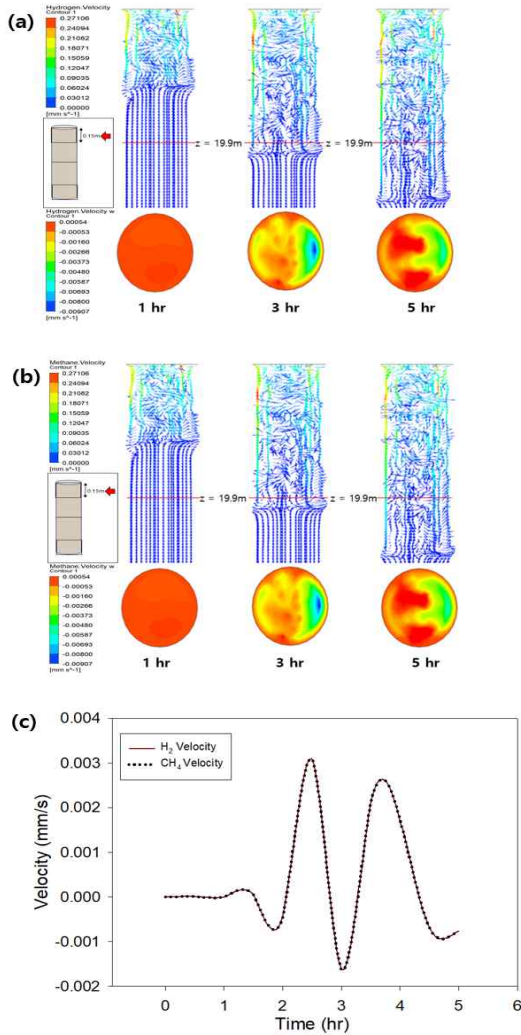


Fig. 7. Hydrogen and methane velocities in the upper section of the pipe. (a) Hydrogen velocity vectors, (b) methane velocity vectors and (c) hydrogen and methane velocities at $z = 19.9$ m.

시간이 지날수록 성층화 과정에서 발생하는 속도장이 배관 중심부로 확대되어 가는 모습을 볼 수 있다. 시간이 1 hr 지났을 경우에는 $z = 19.9$ m 단면에서 성층화 유동이 나타나지 않았으며, 수소와 메탄은 균일하게 상승하는 유동이 발생한다. 3 hr가 지나면 성층화 유동이 $z = 19.9$ m 단면까지 내려오게 되며 단면 내부에서 복잡한 와류가 형성됨을 볼 수 있다. 5 hr가 경과하면 성층화 영역이 더욱 더 확대되어 $z = 19.9$ m 단

면에서의 와류 현상도 증폭이 된다. 상단 벽면 근처에서는 상승하는 성층화 유동이 상단 벽면과 충돌하면서 벽면의 압력을 증가시키는 효과로 나타난다. 본 논문에 포함하지 않았지만 하단부에서도 단면에서의 속도 방향은 반대이지만 동일한 유동현상이 나타났다. Fig. 7(c)는 $z = 19.9$ m 단면에서의 수소와 메탄의 평균 속도를 나타낸 그림이다. 수소와 메탄의 속도 차이는 크지 않지만 초반엔 일정하게 흘러가다가 와류가 생성되는 1.5 hr 정도부터 불안정한 속도가 형성되어있는 것을 확인할 수 있다.

3.2 직경 및 길이에 따른 성층화 변화 분석

Fig. 8(a)는 7일이 지난 후 직경에 따른 수소의 농도 분포를 수직 배관의 상단부 0.5 m와 하단부

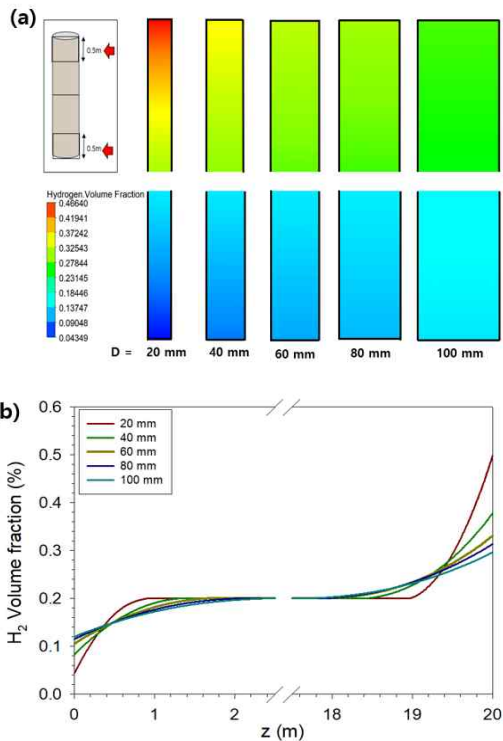


Fig. 8. Comparison of the hydrogen volume fraction for various pipe diameters after 7 days. (a) Contours of hydrogen volume fraction and (b) hydrogen volume fraction along the pipe length.

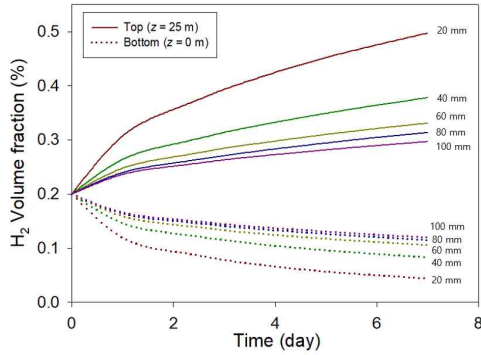


Fig. 9. Variations of the hydrogen volume fraction in the top and bottom of the vertical pipe for various pipe diameters.

0.5 m에서 비교하였다. 이 그림에서 직경이 작은 관일수록 성층화가 더 활발하게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 8(b)는 7일이 지난 후 배관 중심의 수직 방향 길이에 따른 수소 농도를 직경별로 나타낸 그래프이다. 직경이 작을수록 수소의 최고농도는 더 많이 상승하지만 성층화가 발생하는 수직 방향 영역은 좁아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9(a)는 시간에 따른 수직 배관의 상단과 하단의 벽면 근처에서의 수소 농도 변화를 나타낸 그래프로서 직경에 따라 비교하였다. 시간이 지남에 따라 상단부 수소의 농도는 증가하고 하단부는 감소한다. 또한 직경이 작을수록 수소 농도의 변화가 크게 나타난다. 그러나 직경이 커질수록 그 차이가 점점 작아지는 것을 확인할 수 있다. 상단부를 기준으로 하여 그래프를 curve-fit 하였을 때 시간에 따른 수소 농도 변화는 $\alpha_{H_2}(t) = \alpha_0 + a(1 - e^{-bt})$ 의 지수함수 형태로 나타

Table 2. Curve-fit data for hydrogen volume fraction according to the pipe diameter

D (mm)	a	b
20	0.3180	0.3058
40	0.1916	0.2926
60	0.1398	0.3001
80	0.1260	0.2672
100	0.1020	0.3121

난다. 여기서 y_0 는 초기 수소 농도로서 0.2이고, a, b 값은 배관 직경에 따라 달라지며 그 결과를 Table 2에 정리하였다. a값은 배관 직경이 클수록 값이 작아지고 b값은 배관 직경과 무관하게 거의 일정한 값을 가진다. b값은 본 연구에서는 고찰하지 않았지만 온도나 압력의 영향을 받을 것으로 생각된다.

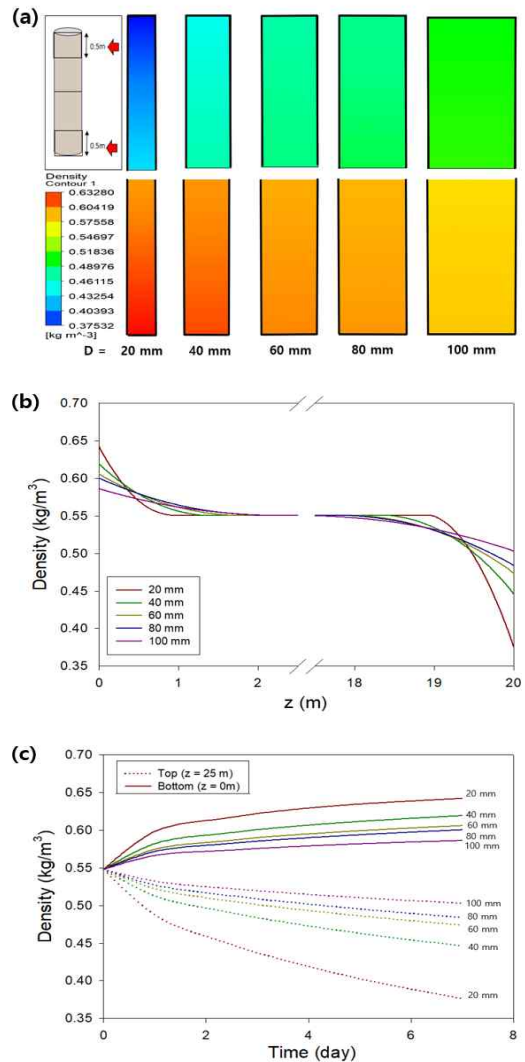


Fig. 10. Comparison of the density of gas mixture for various pipe diameters. (a) Density contours after 7 days, (b) density along the pipe length after 7 days and (c) temporal variations of the density at the top and bottom of the pipe.

Fig. 10에서는 직경에 따른 혼합가스의 밀도 분포를 비교하였다. Fig. 10(a)는 수직 배관의 상단부 0.5 m와 하단부 0.5 m에서 7일이 지난 후 밀도 분포를 나타낸 그림이고, Fig. 10(b)는 배관 중심의 수직 방향 길이에 따른 밀도를 직경별로 나타낸 그래프이다. 성층화가 진행되면서 상단부의 밀도는 낮아지고 하단부의 밀도는 증가한다. 무거운 밀도를 가지고 있는 메탄은 아래로 가라앉고 가벼운 밀도를 가진 수소는 떠오르기 때문이다. 직경이 작은 배관일수록 7일 후 밀도의 변화는 더 크게 나타남을 알 수 있다. 밀도 변화가 크다는 것은 성층화가 더 빨리 진행됨을 의미한다. Fig. 10(c)는 시간에 따른 수직 배관의 상단과 하단의 벽면 근처에서의 혼합가스 밀도 변화를 직경에 따라 비교하였다. 전체적으로 혼합가스 밀도는 수소 농도와 반대의 경향을 가지고 있다. 시간이 지남에 따라서 상단부 혼합가스 밀도는 감소하고 하단부는 증가한다. 직경이 작을수록 혼합가스의 밀도 변화가 커진다.

Fig. 11은 7일이 지난 후 수소와 메탄의 상부 0.5 m 부근의 속도장을 보여주고 있다. 7일이 지나면 배관 상단부는 성층화가 상당히 진행된 상태이나 와류의 형태는 복잡하게 나타난다. 작은 배관에서는 크기가 작은 와류가 많이 발생하는데 반하여 큰 배관에서는 와류의 크기가 크고 개수는 상대적으로 적다. 성층화 과정에서 발생하는 와류는 가벼운 수소의 부력에 의한 자연대

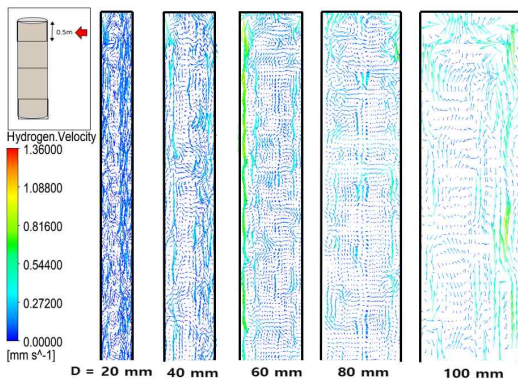


Fig. 11. Hydrogen velocity vectors in the upper section of the vertical pipe after 7 days for various pipe diameters

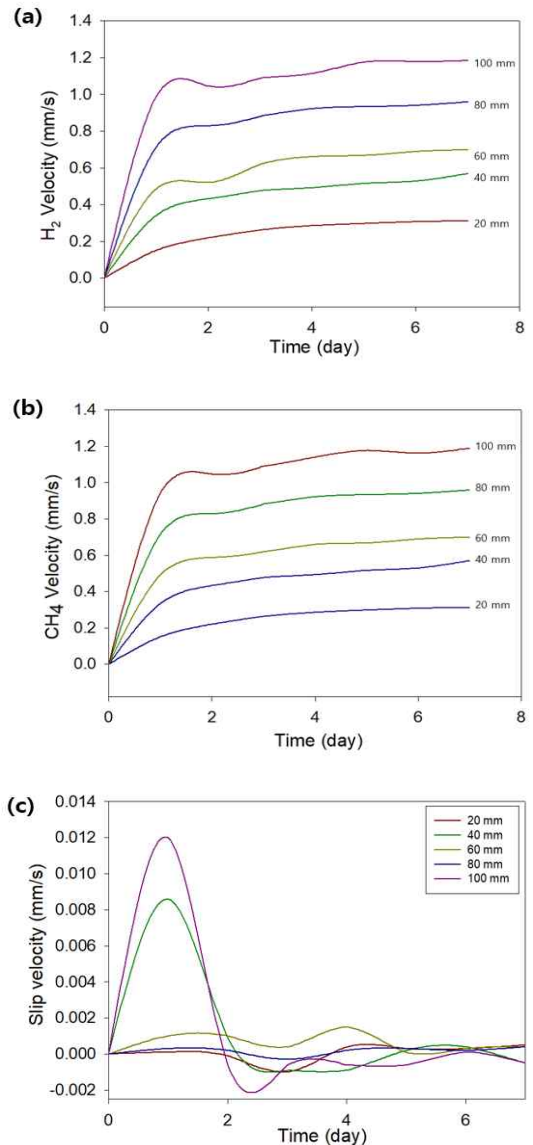


Fig. 12. Comparison of hydrogen, methane and slip velocities for various pipe diameters. (a) Temporal variations of H_2 velocity, (b) temporal variations of CH_4 velocity and (c) temporal variations of the slip velocity (H_2 velocity - CH_4 velocity).

류 현상이다. 좁고 긴 배관에서는 배관의 직경이 유동의 특성길이에 해당하므로 와류의 크기도 배관의 직경에 비례하여 증가하는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 12(a-b)에서는 시간의 따른 수소와 메탄의

속도 변화를 직경별로 비교하였다. 속도는 상부 0.5 m 구간에서의 평균속도이다. 대체로 수소와 메탄의 절대 속도는 비슷하며, 시간이 지남에 따라서 속도가 점점 증가하고 있는데 초기 1~2 일 사이에 큰 변화가 있다가 그 이후로는 크게 변하지 않는다. 또한 직경이 클수록 수소와 메탄의 속도가 모두 빨라진다. 그 이유는 직경이 큰 배관은 더 넓은 단면적을 가지므로 마찰 저항이 상대적으로 작고, 같은 부력 하에서 더 많은 양의 기체가 이동할 수 있기 때문이다. Fig. 12(c)는 Fig. 12(a-b)의 데이터를 이용하여 수소와 메탄의 상대적인 속도 차이인 slip velocity를 보여주고 있다. slip velocity는 시간이 가면서 0을 중심으로 진동하는 모습을 보인다. 초기에 큰 값을 가지다가 시간이 지나면서 진폭이 급격히 줄어드는데, 이는 Fig. 9에서 살펴본 바와 같이 시간이 지나면서 수소 농도 변화율이 줄어드는 원인이 된다. slip velocity의 진동은 직경이 클수록 진폭이 작다. 직경 20 mm와 40 mm에서는 초기에 큰 양의 slip velocity를 가지고 있으며, 이 slip velocity가 성층화 현상을 만들어 내는 핵심 요소이다. 성층화는 수소와 메탄이 분리되는 현상으로 수소의 속도와 메탄의 속도가 차이가 나면 혼합가스 내 체적분율이 달라지는 요인이 된다. 직경이 상대적으로 큰 60~100 mm 배관은 두 기체의 절대적인 속도는 크지만 slip velocity가 매우 적어 성층화가 더디게 일어난다.

Fig. 13에서는 배관의 직경을 20 mm로 고정하고 길이를 20~100 m로 변화시키면서 성층화 특성을 살펴보았다. Fig. 13(a)는 7일의 시간이 지난 후 길이에 따른 수소의 농도 분포를 수직 배관의 상단부 0.5 m와 하단부 0.5 m에서 비교하였다. 그 결과 길이에 따른 영향은 매우 작음을 볼 수 있다. 이를 정량적으로 확인하기 위해서 Fig. 13(b)에서는 7일이 지난 후 수직 방향 위치에 따른 수소 농도를 비교하였고, 수직 방향 위치는 배관의 길이 L 로 무차원화 하였다. Fig. 13(c)에서는 시간에 따른 수소 농도 변화를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 배관의 길이가 20 m에서 100 m까지 변하더라도 수소 농도는 큰 차이가 나타나지 않는다. 자연대류에 의해

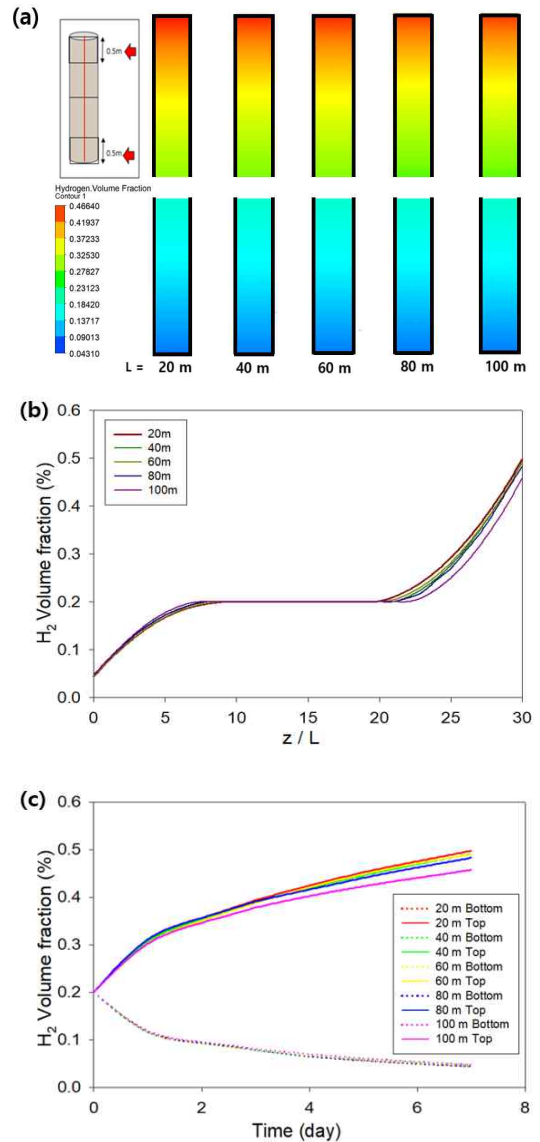


Fig. 13. Comparison of the hydrogen volume fraction for various pipe lengths. (a) Contours of hydrogen volume fraction, (b) hydrogen volume fraction along the pipe length and (c) variations of the hydrogen volume fraction in the top and bottom of the vertical pipe.

나타나는 수소의 성층화 유동은 특성길이가 배관의 직경과 같다. 즉, 와류의 크기가 배관 직경 크기와 같으므로 와류의 속도도 비슷하며, 직경

에 비해 매우 긴 길이의 배관($L/D > 10$)에서는 길이의 영향이 크지 않다. 참고로 본 연구에서 사용된 배관은 $L/D = 1,000\sim 5,000$ 이다.

4. 결론

본 연구에서는 수소가 혼입된 도시가스의 수직 배관 내 혼합가스의 성층화 현상을 수치해석적으로 고찰하였다. 도시가스는 메탄으로 가정하여 정지된 수소(20%)-메탄(80%) 혼합가스의 비정상 성층화 유동 특성 및 배관 직경과 길이에 따른 영향을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

초기 정지상태인 수소-메탄 혼합가스는 시간이 지나면서 부력에 의해 가벼운 수소가 상승하고 무거운 메탄이 하강하는 자연대류 현상과 더불어 성층화가 진행된다. 성층화는 수직 배관의 상단부와 하단부에서 먼저 진행되며, 시간이 지나면서 상단부의 수소 농도가 증가하고 성층화 영역이 확대되나 그 증가율은 점점 줄어든다. 이는 상단부의 수소 농도가 높아지면서 부력에 의한 힘이 줄어들기 때문이다. 성층화 과정에서 단면 내부에서 복잡한 와류가 형성되고, 배관 상단과 하단은 정체압으로 인해 압력이 증가하는 반면 중앙부는 압력이 감소한다.

배관 직경이 작을수록 수소의 최고농도는 더 많이 상승하지만 동일한 시간에서 성층화가 진행된 영역은 좁아진다. 성층화 과정에서 발생하는 와류의 크기는 배관의 직경에 비례하여 증가하며, 직경이 클수록 마찰 저항이 작아 수소와 메탄의 이동 속도가 증가한다. 수소와 메탄의 상대적인 속도 차이인 slip velocity는 초기에 큰 폭으로 진동하다가 시간이 지나면서 진폭이 급격히 줄어든다. slip velocity는 성층화 현상을 만들어 내는 핵심 요소이며, 배관 직경이 클수록 진폭이 작아 빠른 유속에도 불구하고 성층화는 더디게 일어난다. 와류의 크기가 배관 직경 크기와 같으므로 직경에 비해 매우 긴 길이의 배관에서의 성층화는 배관 길이에 의한 영향이 크지 않다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00237341, 주택용/산업용 연소기·가스기기 연소성능 안전성 검증 및 안전기술 개발)

REFERENCE

- 1) Kovač, A., Matej, P. and Doria, M., 2021, "Hydrogen in Energy Transition: a Review," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46(16), pp. 10016~10035.
- 2) Ogden, J., Daniel, S., Zane, M. and Marshall, M., 2018, "Natural Gas as a Bridge to Hydrogen Transportation Fuel: Insights from the Literature," *Energy Policy*, Vol. 115, pp. 317~329.
- 3) Shin, Y. and Cho, E. S., 2021, "Numerical Study on H₂ Enriched NG Lean Premixed Combustion," *Journal of the Korean Society Combustion*, Vol. 26(1), pp. 51~58.
- 4) Talibi, M., Balachandran, R. and Ladommatos, N., 2017, "Influence of Combusting Methane-Hydrogen Mixtures on Compression-Ignition Engine Exhaust Emissions and in-Cylinder Gas Composition," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42(4), pp. 2381~2396.
- 5) Park, H. Y., Yoon, S. H., Rho, B. S., Lee, W. J. and Choi, J. H., 2019, "Effect of Hydrogen (H₂) Addition on Flame Shape and Combustion Products in Mixed Coflow Diffusion Flames of Methane (CH₄), Ethane (C₂H₆) and Propane (C₃H₈)," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 25(6), pp. 780~787.
- 6) Capurso, T., Stefanizzi, M. and Torresi, M., 2022, "Perspective of the Role of Hydrogen in the 21st Century Energy Transition," *Energy Conversion and Management*, Vol. 251, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114898>.

- 7) Baek, J. H., Lee, H. J. and Jang, C. B., 2016, "Comparison of H₂, LNG, and LPG Explosion Characteristics In a Limited Space Using CFD Simulation," *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 20(3), pp. 12~21.
- 8) Huang, H. X., Li, Y. H., Li, Z. Z. and Hou, P. W., 2022, "Role of Hydrogen in Stability and Mobility of Vacancy Clusters in Tungsten," *Tungsten*, Vol. 4(3), pp. 219~230.
- 9) Hong, W., Yoon, S. H. and Jeon, M. G., 2022, "A Study on the Real-Time Temperature and Concentration Measurement of Combustion Pipe Flow Field," *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 20(2), pp. 86~92.
- 10) Liu, C., Pei, Y., Cui, Z., Li, X., Yang, H., Xing, X. and Li, Y., 2023, "Study on the Stratification of the Blended Gas in the Pipeline with Hydrogen Into Natural Gas," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48(13), pp. 5186~5196.
- 11) Ren, S. and Zhang, Q., 2015, "Influence of Concentration Distribution of Hydrogen in Air on Measured Flammability Limits," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 34, pp. 82~91.
- 12) Boulahlib, M. S., Medaerts, F. and Boukhalifa, M. A., 2021, "Experimental Study of a Domestic Boiler using Hydrogen Methane Blend and Fuel-Rich Staged Combustion," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46(75), pp. 37628~37640.
- 13) Marangon, A. and Carcassi, M. N., 2014, "Hydrogen-Methane Mixtures: Dispersion and Stratification Studies," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31(11), pp. 6160~6168.
- 14) Vudumu, S. K. and Umit, O. K., 2009, "Detailed Simulations of the Transient Hydrogen Mixing, Leakage and Flammability in Air in Simple Geometries," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34(6), pp. 2824~2833.