

DME-Propane 액화연료의 혼합특성에 대한 CFD 시뮬레이션

김차환 · 천석훈 · 신동우 · 김래현[†] · 이현찬* · 백영순*

서울과학기술대학교 에너지환경대학원
139-743 서울시 노원구 공릉로 232
*한국가스공사 연구개발원 DME 연구개발
406-840 인천광역시 연수구 송도동 364
(2011년 6월 27일 접수, 2011년 8월 8일 채택)

CFD Simulation for Mixture Characteristic of DME-Propane Liquified Fuels

Cha-Hwan Kim, Seuk-Hoon Chun, Dong-Woo Shin, Lae-Hyun Kim[†], Hyun-chan Lee* and Young-soon Baek*

Graduate school of energy and environment, Seoul National University of Science and Technology
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

*DME Research Team, R&D Division, Korea Gas Corporation, 364 Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon-city 406-840, Korea
(Received 27 June 2011; accepted 8 August 2011)

요 약

상용 CFD 소프트웨어 FLUENT를 이용하여 혼합탱크 내에서 DME와 Propane 두 가지 액화연료의 혼합에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 직경 1 m, 높이 2.5 m의 3D 혼합탱크를 모사하고 혼합탱크 상부에 DME가 146 l, 하부에 프로판 770 l가 존재하는 초기조건을 설정하여 34시간 동안 시뮬레이션을 진행하였으며, 시간대별 혼합 및 유동특성에 대하여 알아보았다. 혼합연료는 약 24시간 경과 후 3 mol% 범위 내에서 균일하게 혼합되었으며, 34시간 경과 시 1 mol% 내에서 균일하게 혼합되었다. 4시간 이후의 시뮬레이션 결과는 한국가스공사에서 수행된 DME 연료 실증 시험연구 기술개발 실험결과와 상당히 일치함을 확인하였다.

Abstract – In this study, CFD simulation was performed with commercial CFD code FLUENT for the 3D mixing tank model (1 m in a diameter and 2.5 m in a height) of DME-Propane liquified fuels. Initial condition set-up with existence of DME 146 l at the upper side of mixing tank and Propane 770 l at the lower side of mixing tank. Characteristics of mixture and fluid flow were observed for 34 hours simulation. Two liquid fuel were uniformly mixed within range of 3 mol% after 24 hours, and range of 1 mol% after 34 hours. The simulation result following 4 hours was verified with KOGAS experimental data.

Key words: CFD, DME, LPG, Mixture, Mixing Tank

1. 서 론

석유자원 고갈에 대비하여 세계 각국에서는 신재생에너지 개발 연구를 활발하게 진행하고 있다. DME(Di-methyl ether, CH_3OCH_3)는 천연가스뿐만 아니라 석탄, 바이오매스로부터 직접합성 또는 메탄올 탈수반응을 통한 간접합성방법으로 생산이 가능하다. DME는 독성이 없고 취급이 용이하며, 다양한 용도를 지닌 것으로 최근 화석연료를 대체할 청정에너지로 대두되고 있다. DME는 물성이 액화석유가스(Liquified Petroleum Gas, LPG)와 유사하며 쉽게 LPG와 혼합되는 특성이 있어 LPG에 DME를 혼합한 혼합연료는 기존 LPG 산업 인프라의 큰 변경 없이 그대로 사용할 수 있는 장점이 있

으며 가정/상업용으로 보급이 가능하다. 또한, DME는 분자구조 내에 탄소-탄소 결합이 없어 연소시 매연이 거의 배출되지 않는 합산소 연료로서 환경 규제치를 만족할 수 있는 청정 수송용 에너지로서 각광받고 있다[1-4].

현재까지 DME-LPG 혼합연료와 관련된 연구는 주로 실제 혼합된 연료에 대한 물리적 특성 분석, 연소특성 그리고 차량연료로서의 엔진과 배기특성에 미치는 영향 등에 대하여 연구가 진행되었고, 2009년 이후 LPG 대체연료로서 LPG의 주성분인 프로판과 부탄에 DME를 각각 20%, 5%를 혼합하여 가정용과 수송용으로 시범보급을 하고 있다. DME-Propane의 연료혼합은 혼합탱크 내로 각각의 액체연료를 차례로 투입하여 혼합하는 순차혼합방법과 예혼합기를 통한 동시혼합의 두가지 방법으로 혼합을 하고 있다.

순차혼합 방법은 혼합탱크에 5기압으로 액화된 DME를 먼저 주입을 하고난 뒤, 7기압으로 액화된 프로판을 주입하는 방법으로 탱

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: lhkim@snu.ac.kr

*이 논문은 서울과학기술대학교 손재익 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

크 내에서 액체연료 상호간의 분자확산과 유동에 의해 혼합하는 방식이며, 예혼합기를 통한 동시혼합 방법은 예혼합기 좌, 우에서 액체 DME와 액체 프로판을 동시에 주입하여 내부에 스크류 형상을 가진 혼합기를 통과하며 예혼합된 연료를 혼합탱크에 주입하는 방법으로 예혼합기를 통해 대부분의 연료가 혼합된 상태로 혼합탱크 내부로 주입되기 때문에 순차혼합 방법에 비하여 상대적으로 보다 빠른 시간 내에 연료를 혼합할 수 있는 장점이 있다. 이러한 두 가지 혼합방법을 통한 연료혼합은 한국가스공사에서 제조된 DME를 활용하여 현장에서 지름 1 m, 높이 2.5 m인 혼합탱크에서 혼합되어 전국 4개소에 시범보급 사업자에게로 보급이 되고 있다[5-7].

그러나, DME-LPG 혼합연료의 안정적 보급을 위해서는 혼합방법과 저장특성에 대한 연구를 통하여 적정 수요에 대한 공급 대처능력을 확보해야 한다. 따라서 향후 상용화 규모의 scale-up을 위해서는 대규모 실험설비의 확보와 고압의 실험조건 등으로 인한 실험적 고찰의 한계를 극복할 수 있는 시뮬레이션 연구가 필수적이다.

이에 본 연구에서는 상용 프로그램인 ANSYS사의 FLUENT(ver 12.1)를 사용하여 실제 시험보급사업에 적용된 demo scale의 DME-LPG 혼합설비 규모를 모사하여 DME-Propane 순차혼합방법에 대해 기초 시뮬레이션 연구를 시행하고 실험결과와 비교하였다.

2. 유체 지배방정식과 수치해석대상모델

2-1. 수치해석과 지배방정식

본 연구에서는 상용 CFD software인 FLUENT를 수치해석에 사용하였고, euler-euler 접근방식의 multiphase mixture 모델을 적용하였다. Mixture 모델은 둘 또는 다 상(phases)에 대하여 디자인되었으며 다양한 방법으로 사용될 수 있는 단순화된 다상 모델이다. 이 모델은 혼합에 대한 운동방정식, 연속방정식 그리고 에너지방정식을 계산하고, 두 번째 상에 대한 체적비를 계산하며, 상대 속도에 대한 대수방정식을 계산함으로써 각 상에 대한 수치해석을 수행한다. Mixture 모델은 상대적으로 좀 더 정교한 동일한 euler 접근법의 eulerian 모델을 대체할 수 있는 좋은 모델이다. 따라서 DME-Propane 두 액체연료의 거시적인 혼합특성을 분석할 기초 모델로 mixture 모델을 선정하였고, 혼합탱크 내에서 확산에 의한 혼합특성을 분석하기 위해 no reaction 조건의 species transport를 적용하였으며, 유동해석에 사용된 지배방정식은 아래와 같다.

연속방정식(Continuity equation)

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

여기서, \vec{v}_m 은 질량평균속도(mass-averaged velocity), ρ_m 혼합밀도(mixture density)이며, $\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m}$, $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$ 로 표현된다.

운동량 보존방정식(Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

여기서 p 는 압력, \vec{g} 와 \vec{F} 는 각 중력벡터와, body force를 나타내며, μ_m 은 점도를 나타내며, $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$ 로 표현된다.

에너지 방정식(Energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

여기서 k_{eff} 는 난류모델의 난류열전도도에 따른 effective conductivity 이고, 오른쪽 첫 번째 식은 에너지 이동, S_E 는 다른 체적의 heat source를 포함하며, E_k 는 아래식으로 표현된다.

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (4)$$

체적분율 방정식(Volume fraction equation)

식 (1)의 연속방정식으로부터 두 번째상 p에 대한 체적분율을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (5)$$

확산 방정식(Diffusion equation in multiphase model)

일반적으로 종 전달(species transport) 모델에서의 확산식은 아래와 같이 표현된다.

$$\vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (6)$$

여기서 $D_{i,m}$ 질량확산 계수, $D_{T,i}$ 는 열확산 계수이다. 이 식이 multiphase 모델에 적용될 경우 무반응 조건에서의 화학적 종 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho^q \alpha^q Y_i^q) + \nabla \cdot (\rho^q \alpha^q \vec{v}_i^q Y_i^q) = -\nabla \cdot \alpha^q \vec{J}_i^q + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{q,p} - \dot{m}_{p,q}) \quad (7)$$

식 (7)에서 Y_i^k 는 각 종의 질량분율, $\dot{m}_{p/q}$ 는 첫 번째 상(phase) q로부터 두 번째 상 p로의 종(species) i와 j 사이의 질량전달을 나타낸다[8-10].

두 액체 연료사이의 확산계수는 아래의 Wilke-Chang 방정식을 사용하여 Table 1의 물성정보를 참고하여 계산하였으며, 액체 DME와 액체 프로판의 상호 확산계수는 식 (8)로부터 $6.74E-9 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 계산되었다[11,12].

$$D_v = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\psi_B M_B)^{1/2} T}{\mu V_A^{0.6}} \quad (8)$$

2-2. 대상모델 형상화 및 격자 구성

본 연구에서는 DME와 프로판 두 가지 액체연료의 혼합 및 유동특성을 확인하기 위하여 ANSYS Design Modeler를 사용하여 직경 1 m, 높이 2.5 m의 혼합탱크를 대칭면을 경계로 하여 절반 형상을 모사하였다. 실제 혼합탱크는 혼합탱크 좌측에 1" 주입구가 존재하나, 본 연구에서는 혼합탱크 내에 두 액체 연료가 상, 하로 구분되

Table 1. Physical properties of liquified DME and liquified propane

| Classification | DME | Propane |
|--|-------------|-------------|
| Molecular weight [g/mol] | 46.07 | 44.1 |
| Liquid density [kg/m ³] | 670 | 582 |
| Liquid viscosity [kg/m-s] | 0.000149 | 0.000099 |
| Surface tension [10 ⁻³ N/m] | 11.36 | 7.02 |
| Thermal conductivity (w/m-k) | 0.1453 | 0.1588 |
| Standard st. enthalpy (j/kgmol) | -1.8410E+08 | -1.0450E+08 |

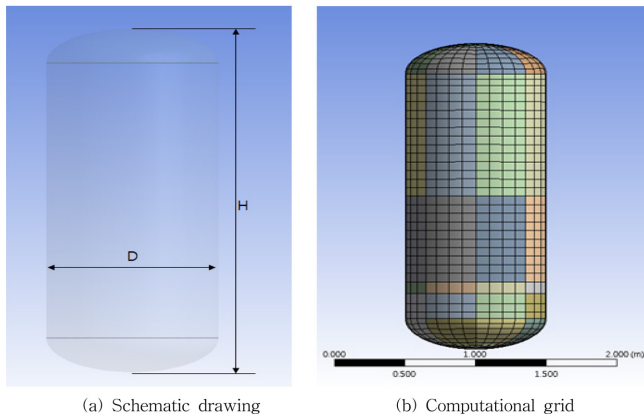


Fig. 1. Schematic drawing and computational grid of mixing tank.

Table 2. Dimensions of mixing tank components (unit : cm)

| H | D |
|-----|-----|
| 250 | 100 |

어 완전히 차있는 경우를 가정하였으므로 1" 주입구는 생략을 하였으며, 그 형상과 격자를 Fig. 1에 각각의 치수를 Table 2에 나타내었다.

혼합탱크 내의 공간은 여러 개의 격자(mesh)로 나누었는데 hexagonal 4,000개를 사용하여 격자를 구성하였다. CFD를 이용한 해석에서는 격자의 수를 증가시켜 좀 더 정확한 해석을 할 수 있으나, 격자수의 증가는 계산시간과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 적절한 격자수를 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 거시적인 DME-Propane 연료 혼합의 경향성을 분석하고, 최종 실험결과와의 비교 분석을 위해 최소 20시간 이상의 시뮬레이션을 수행하여야 하므로 격자의 품질을 유지하는 범위에서 최대한 격자수를 줄여서 구성하였다.

2-3. 시뮬레이션 입력 및 경계조건 설정

본 연구 모델에서는 작동유체로 액체 DME와 액체 프로판을 사용하였다. 혼합탱크 상부에 DME 146 l, 하부에 프로판 770 l를 가득 채운 상태를 초기조건으로 설정하고 34시간 동안 시뮬레이션을 진행하였다. Time step은 시뮬레이션 초기 2시간 동안 0.5초, 2시간 이후부터 1초 간격으로 시행하였다. 시뮬레이션의 세부 입력조건은

Table 3. Numerical solution parameters used in the CFD simulation

| | |
|-------------------------|---|
| Models | Multiphase mixture & species transports |
| Materials (Liquid) | DME (CH_3OCH_3), Propane (C_3H_8) |
| Solution Method | PISO |
| Discretization | Pressure : PRESTO! |
| | Momentum : default |
| | Energy : default |
| | Volume fraction : default |
| Under-relaxation factor | Pressure : 0.3 |
| | Density : 1 |
| | Body force : 1 |
| | Momentum : 0.7 |
| | Volume fraction : 0.5 |
| Convergence criteria | Energy : 1 |
| | $10^{-6} \sim 10^{-3}$ |
| Time step | 0.5~1 sec |

아래 Table 3에 자세히 나타내었다.

계산은 Intel Xeon CPU 2.53Ghz HP Z600 워크스테이션으로 시행되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 현재 대표적으로 사용되고 있는 순차혼합 방법과 동시혼합 방법의 CFD 모델 중 우선 순차혼합 방법을 모델링하는 연구의 기초단계로써 탱크내부에 두 액체 연료가 가득차 있는 경우를 가정하여 보다 무거운 DME를 혼합탱크 상부에 위치시켜 시물레이션 시작과 동시에 무거운 DME가 중력에 의하여 하부로 이동하면서 자연스럽게 순차혼합의 효과를 나타낼 수 있도록 초기조건을 설정하였다. 혼합탱크 상부에 DME 146 l(17 mol%), 하부에 Propane 770 l(83 mol%)가 채워진 상태를 초기조건으로 하여 34시간의 시물레이션을 수행하여 혼합탱크내에서 두 액체연료의 혼합 및 유동특성을 분석하였다.

순차혼합 방법의 경우에는 균일하게 연료가 혼합되기까지 약 24시간의 시간이 소요되나, 예혼합기를 통한 동시혼합 방법의 경우 4시간 이내에 연료가 균일하게 혼합 된다는 결과를 한국가스공사에 실시한 “DME 연료 실증 시험연구 기술개발” 실험결과로 확인할 수 있었다. 향후 본격적인 DME 연료의 보급이 시행될 경우에는 각종 수요에 대비한 신속한 보급이 절대적이라 할 수 있으므로 순차혼합 방법보다는 동시혼합 방법에 의한 연료 혼합이 좀 더 보편화될 것으로 전망되나, 여러 가지 혼합 방법에 대한 연구는 좀 더 진행되어야 할 것이다.

Fig. 2(a)에서와 같이 시물레이션 시작과 함께 상부에 위치한 보다 무거운 DME는 중력장에서 자연대류와 확산에 의해 혼합탱크 하부로 이동하는 유동을 나타내며 두 연료는 혼합이 되기 시작한다. 약 20분 경과 후 유동이 안정화되고 밀도차에 의한 층상화(stratification) 현상을 확인할 수 있었다. 무거운 DME가(밀도 $\rho=670 \text{ kg/m}^3$) 초기에 탱크 하부로 이동하는 유동의 영향으로 Fig. 2(b)에서와 같이 1시간 경과 후 79~88 mol%의 분포를 나타내는 층상화 현상을 확인할 수 있었으며, 시간의 경과에 따라 층상화 현상이 점점 줄어드는 것을 Fig. 2(c), (d)에서와 같이 관찰할 수 있었다. 18시간 경과 이후부터 자연대류와 확산에 의해 탱크 전체적으로 균일하게 혼합되기 시작하는 것을 Fig. 2(e), (f), (g)를 통해 확인할 수 있었으며, 24시간 이후 약 3 mol% 범위 내에서 혼합탱크 전체적으로 균일하게 혼합되었다.

혼합탱크 내의 초기 유동과 각 시간에 따른 유동을 streamline을 통해 확인한 결과를 Fig. 3에 자세하게 나타내었다. Fig. 3(a)에서와 같이 시물레이션 초기 유동 streamline은 탱크 전체적으로 중력과 밀도차에 의하여 혼합탱크 상부에서 하부로 이동하는 자연대류의 흐름을 관찰할 수 있다. 이러한 큰 유동현상은 시물레이션 5분 정도까지 일부 지속되며, 30분 이후는 상하로 이동하는 유동이 거의 종료되고 층상화에 의한 유동을 관찰할 수 있다.

높이 2.5 m의 혼합탱크의 수직 위치에 따른 혼합정도를 확인하기 위하여 혼합탱크 중심부에서 수직으로 1 cm 간격으로 DME와 Propane의 mol%를 수치화하였으며, 탱크 하부로부터 40, 80, 120, 160, 200 cm 5개의 위치별로 그래프화하여 Fig. 4에 나타내었다. 그래프화한 시료채취 위치는 실제 실험장비의 위치와 동일한 위치를 선정하여 현장에서 이루어지는 실험결과와 비교 분석을 통해 오차를 확인할 수 있도록 하였다. 프로판과 DME는 Fig. 4에서 보듯이 시간

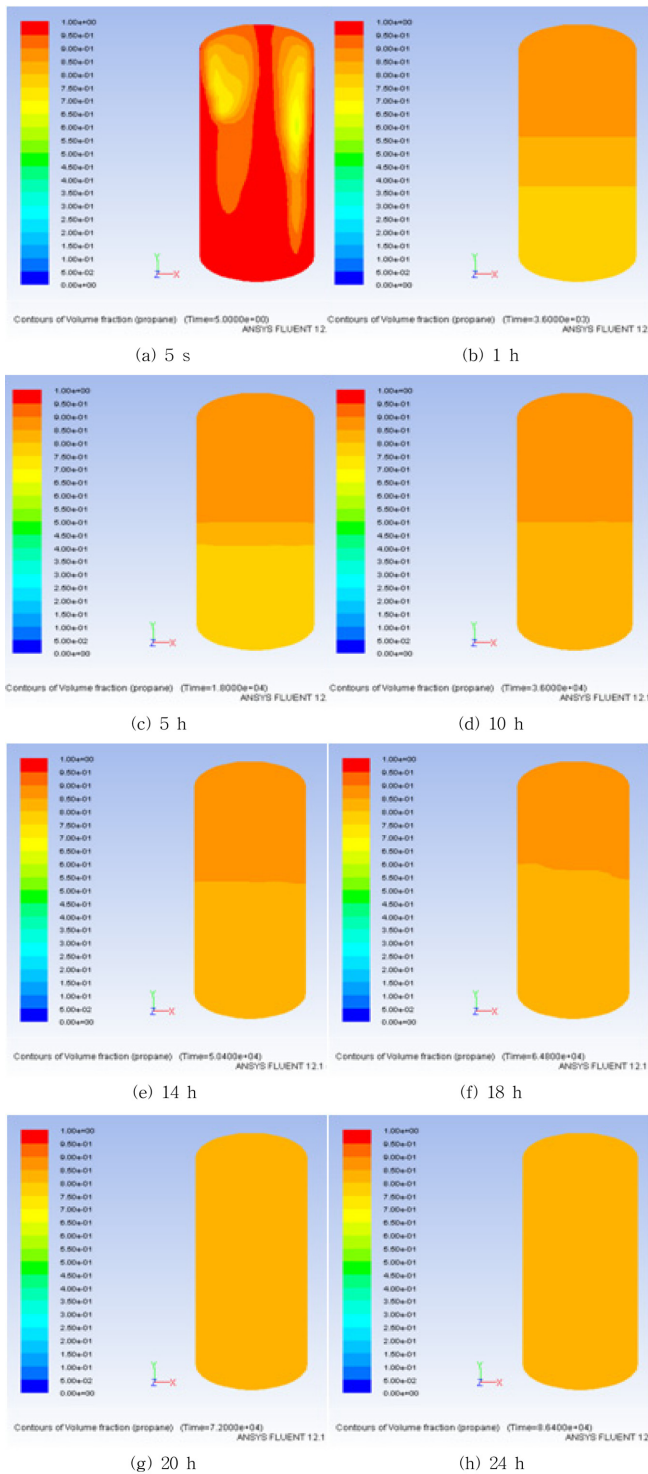


Fig. 2. Contour of propane mol% as a time transient.

변화에 따라 자연대류와 확산에 의해 서서히 혼합되기 시작하여 20 시간 경과 이후 약 5 mol% 범위에서 균일하게 혼합되며, 24시간 경과 시 3 mol%, 34시간 경과 시 1 mol% 범위 내에서 두 액체 연료는 균일하게 혼합되었다.

본 시뮬레이션 결과는 한국가스공사에서 2009년 수행한 “DME 연료 실증 시험연구 기술개발” 연구에서의 DME-Propane 순차혼합 실험 결과와도 일치한다고 볼 수 있다. 이 실험에서는 프로판 81

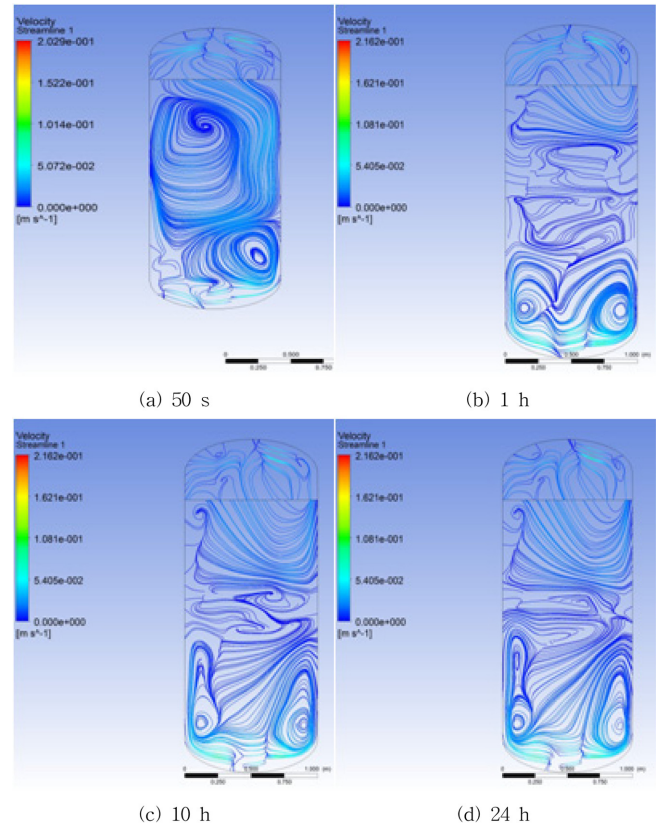


Fig. 3. Streamline of DME-propane mixture.

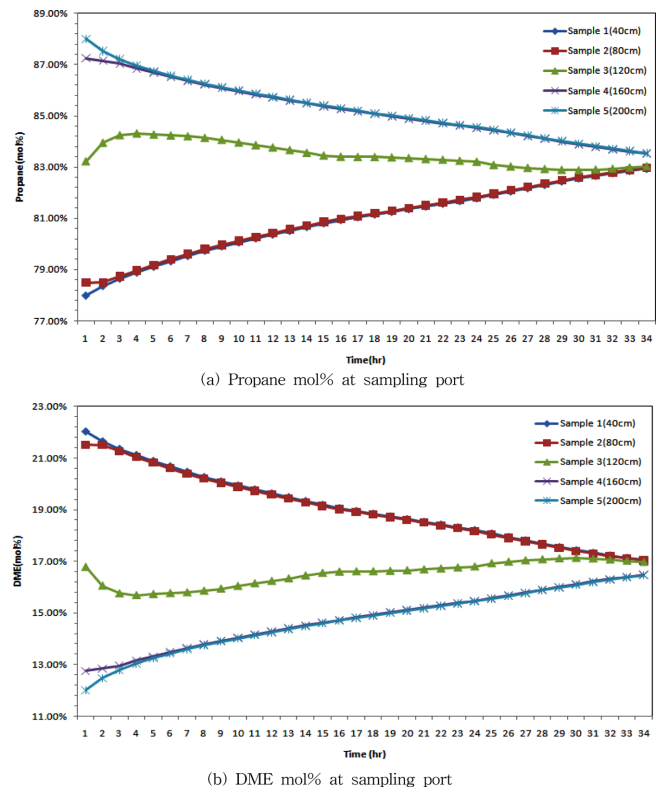


Fig. 4. Graph of mol% at sampling port.

mol%와 DME 19 mol%로 혼합실험을 실시하였으며, 혼합탱크 하부로부터 40 cm 위치에 있는 시료 채취구에서 측정된 연료혼합 실

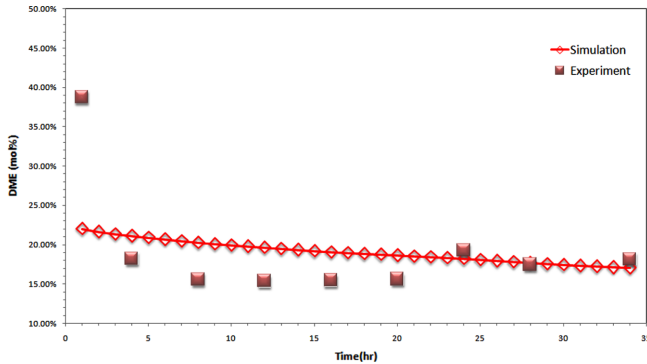


Fig. 5. Comparisons of DME mol% between experiment data and simulation result.

험결과에서는 약 24시간 이후 균일하게 혼합됨을 알 수 있었다. 실험결과와 시뮬레이션결과의 비교 그래프를 아래 Fig. 5에 나타내었다[13].

실험에서는 실험장비 여건의 한계로 4시간 간격으로 시료채취를 실시하여 그 데이터를 시뮬레이션과 비교하였다. 현장 실험시 프로판 연료 주입이 종료된 후 혼합탱크 내의 DME-Propane 혼합도는 가장 유동적인 상태로 다양한 위치에서 다양한 혼합도를 타나낸다. 그러나 시료채취는 혼합탱크 외벽에 설치된 5개의 시료 채취구를 통하여 혼합탱크 벽면에 위치한 시료를 채취하게 되므로 프로판 주입 종료 직후의 시료채취에서는 전체적인 혼합탱크 내부의 혼합도를 나타내기에는 대표성이 부족할 수 있다. 이런 영향으로 실험 초기 값과 시뮬레이션 초기값 사이에는 많은 편차가 발생하게 된 것으로 추측할 수 있으며, 유동이 안정화 된 4시간 이후의 실험값과 시뮬레이션 값에서는 비교적 일치하는 추세선을 확인할 수 있었으며, 24시간 이후에는 균일하게 혼합되는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 실험시 시료채취할 수 있는 곳은 혼합탱크 벽면의 5개소로 한정되어 있어 지점에 따른 다양한 농도분포를 비교분석할 수 없는 한계가 있었다.

4. 결 론

ANSYS FLUENT 12.1 전산유체역학 프로그램을 이용하여 직경 1 m, 높이 2.5 m인 혼합탱크 내에서의 DME-Propane 혼합연료에 대한 혼합 특성 시뮬레이션을 수행하였다. 혼합탱크 모델은 unsteady로 최초 2시간 동안 0.5초, 이후 1초 간격으로 34시간 동안 시뮬레이션을 실시하였다. 초기조건으로 혼합탱크 상부에 DME 146 l (17 mol%), 하부에 프로판 770 l (83 mol%)가 채워진 상태를 가정하여 중력과 밀도차에 의한 자연대류와 확산에 의한 두 액체연료의 혼합 시뮬레이션을 실시하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시뮬레이션 시작 후 혼합탱크 상부에 위치한 DME는 중력과 body force의 영향으로 하부로 이동하는 유동을 나타내며 하부의 프로판과 혼합되기 시작하였다.

(2) 20분 이후 유동이 안정되며 농도분포에 따른 층상화 현상이 나타나고 점점 층상화 현상이 줄어들면서 약 18시간 경과 후 두 액체 연료는 탱크 전체적으로 균일하게 혼합되기 시작 하였다.

(3) 24시간 경과 후 약 3 mol% 범위 이내에서 균일하게 혼합되었으며, 34시간 경과 후 1 mol% 범위 내에서 두 액체 연료는 완전

히 균일하게 혼합되었다.

(4) 본 시뮬레이션 결과는 한국가스공사에서 2009년 수행된 “DME 연료실증 시험연구 기술개발”의 연료혼합 실험결과와도 상당히 일치함을 확인하였다.

(5) 실험 장비와 여건상 다양한 위치에서의 농도분포를 비교 분석할 수 없는 한계도 있었다.

(6) 본 연구를 통해 실제 현장에서 사용되는 순차혼합방법의 CFD 기초 모델을 확립할 수 있었으며, 향후 실제 연료 주입 조건과 동일한 보다 정확하고 정교한 모델을 구현하는 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 한국가스공사의 “2010년 대학협력연구과제(과제명: DME-LPG 혼합연료의 저장탱크에서 조성분포 측정 연구)”의 일환으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

사용기호

| | |
|-----------|--|
| D | : diameter of mixing tank [m] |
| D_v | : diffusion coefficient of liquified DME and Propane [m^2/s] |
| \vec{F} | : body force [$\text{N}/\text{m}^2 \text{ s}$] |
| \vec{g} | : gravitational acceleration [m^2/s] |
| H | : height of mixing tank [cm] |
| J | : diffusion term |
| p | : pressure [Pa] |
| T | : Temperature [K] |

그리스 문자

| | |
|-----------|---|
| α | : volume fraction of the phase [m^3] |
| ρ | : density [kg/m^3] |
| \vec{u} | : mass averaged velocity [m/s] |
| μ | : viscosity [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$] |

아래첨자

| | |
|---|-------------------|
| p | : secondary phase |
| q | : primary phase |
| k | : phase k |
| i | : species i |

참고문헌

1. Cho, W. J. and Kim, S. S., “Current Status and technical Development for Di-Methyl Ether as a New and Renewable Energy,” *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **20**(4), 355-362(2009).
2. Arcoumanis, C., Bae, C., Crookes, R. and Kinoshita, E., “The Potential of Di-methyl Ether (DME) as An Alternative Fuel for Compression-ignition Engines: A Review,” *Fuel.*, **87**, 1014-1030 (2008).
3. Baek, Y. S., Cho, W. J. and Lee, H. C., “The Status of DME Development and Utilization as a Fuel,” *KIC News.*, **13**(2), 1-11(2010).
4. Baek, Y. S., Cho, W. J. and Oh, Y. S., “The Status of DME Development and Utilization as a Fuel,” *J. Energy Eng.*, **16**(2), 73-82(2007).

5. Cho, S. H., Lee, B. H. and Lee, D. U., "Measurement and Calculation of Bulk Modulus for DME," *KSME B.*, **32**(11), 841-848 (2008).
6. Ahn, J. U., Chung, T. Y., Hwang, H. C. and Kim, Y. G., "A Study on the Combustion Characteristics of Butane-DME Mixture Gas," *J. Energy Eng.*, 143-146(2007).
7. Lee, S. H., Oh, S. M., Choi, Y., Kang, K. Y., Choi, W. H. and Cha, K. O., "The effect of N-butane and Propane on Performance and Emissions of a SI Engine Operated with LPG-DME Blended Fuel," *KSAE.*, **08**(s0095), 583-588(2008).
8. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide; ANSYS, INC.(2009).
9. Kim, S. E., Choudhury, D. and Patel, B., "Computations of Complex Turbulent Flows Using the Commercial Code FLUENT," In Proceedings of the ICASE/LaRC/AFOSR Symposium on Modeling Complex Turbulent Flows, Hampton, Virginia(1997).
10. Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., "A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation," *Computers Fluids.*, **24**(3), 227-238(1995).
11. Warren, L. M., Julian, C. S. and Harriott, P., *Unit operations of Chemical Engineering*, 6th ed., McGraw-Hill Korea, 513-515 (2001).
12. DME Data Book; LPG Research Laboratory KHK, Japan(2006).
13. Baek, Y. S. and Lee, H. C., "Development for demonstration and test of DME Fuel," Project No. 2007CCC11P051000, Korea Gas Corporation(2009).